

Методы и технологии обработки мульти- и гиперспектральных данных дистанционного зондирования Земли высокого разрешения*

О. И. ПОТАТУРКИН^{1,2}, С. М. БОРЗОВ¹, А. О. ПОТАТУРКИН¹, С. Б. УЗИЛОВ¹

¹*Институт автоматизации и электрометрии СО РАН, Новосибирск, Россия*

²*Новосибирский государственный университет, Россия*

e-mail: potaturkin@iae.nsk.su

Предложены методы обработки мульти- и гиперспектральных спутниковых изображений высокого пространственного разрешения, предназначенные для их классификации и обнаружения антропогенных изменений на поверхности земли на основе анализа спектральных и структурных признаков.

Ключевые слова: классификация мульти- и гиперспектральных данных, спектральные и пространственные признаки, обнаружение пространственно-временных изменений.

Введение

В последние годы в области создания и развития средств и технологий дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) наблюдается стремительный прогресс. С каждым годом растет число спутников, получающих изображения высокого (1–10 м) и сверхвысокого (менее 1 м) пространственного разрешения в различных спектральных каналах. Всё более активно внедряются в практику методы и средства гиперспектральной съемки. Появились возможности использования данных ДЗЗ для решения ряда новых научных и прикладных задач, связанных с выявлением антропогенного воздействия на природные экосистемы. Однако существенное препятствие на пути их решения — это отсутствие подходящего инструментария для автоматизированного анализа и интерпретации данных. В частности, одним из важнейших и зачастую определяющим успех всей процедуры обработки этапом является сегментация изображений. В результате сегментации формируется множество областей (сегментов), которые содержат пиксели, похожие между собой по некоторым характеристикам, и в своей совокупности покрывают всё изображение. Это позволяет упростить дальнейшую процедуру обработки, поскольку объектами анализа являются уже не отдельные пиксели, а выделенные сегменты. В то же время при решении ряда задач (обнаружение незначительных изменений растительного покрова, мониторинг состояния водоёмов и т. п.) алгоритмы, основанные на предварительной сегментации, оказываются малоэффективными, поэтому требуется применение и дальнейшее развитие методов попиксельной обработки.

Целью данной работы является разработка методов классификации спутниковых изображений высокого разрешения, основанных на попиксельной и позонной обработке

*Работа выполнена при поддержке Президиума РАН (проект № 15.3), СО РАН (интеграционный проект № 74) и РФФИ (гранты № 11-07-00202, № 13-07-12202).

спектральных и пространственных признаков и позволяющих достичь высокой достоверности обнаружения целевых объектов при наблюдении как природных, так и антропогенных ландшафтов.

1. Классификация многоспектральных изображений

Картосхемы, полученные путём попиксельной спектральной классификации спутниковых изображений высокого разрешения, как правило, включают многочисленные вкрапления. Применение сглаживающих процедур их устраняет, однако приводит к искажениям малоразмерных объектов, таких как дороги, здания и т. п. [1].

В настоящей работе предлагается двухэтапный метод классификации спутниковых изображений высокого разрешения, основанный на совместной обработке спектральных и структурных признаков. На первом этапе выполняется спектральная классификация изображения $\hat{I}(x, y)$ методом максимального правдоподобия по зонам интереса, выбранным оператором. Фрагменты картосхемы $I(x, y)$ изображения спутника WorldView 2 представлены на рис. 1, а, б.

На рис. 1, в, г приведен результат сглаживания картосхемы путём выбора наиболее часто встречающегося класса скользящим окном. Данная процедура устраняет нежелательный шум спектральной классификации в природных зонах, однако в антропогенных она приводит к искажению картины. Видно, что для естественных и антропогенных зон при классификации изображений предъявляются различные требования к её масштабу.

На втором этапе для повышения качества классификации анализируемое изображение предложено разделить на природные и антропогенные зоны с помощью пространственных (структурных) признаков [2, 3]. Для этого целесообразно использовать функции отклика Харриса “угол” и “край”

$$R = \det M - 0.04(\text{trace} M)^2, \quad L = (\text{trace} M)^2 - 4\det M, \quad (1)$$

где

$$M = \begin{bmatrix} \sum \left(\frac{dI}{dx}\right)^2 & \sum \left(\frac{dI}{dx}\right) \left(\frac{dI}{dy}\right) \\ \sum \left(\frac{dI}{dx}\right) \left(\frac{dI}{dy}\right) & \sum \left(\frac{dI}{dy}\right)^2 \end{bmatrix}$$

и суммирование ведётся по окрестности $3 \times 3 - 5 \times 5$ пикселей. Пространственное распределение структурных признаков выполняется путём расчёта скользящим окном Ω среднего значения функций (1):

$$F_1(x, y) = \langle R(x, y) \rangle_{\Omega}, \quad F_2(x, y) = \langle L(x, y) \rangle_{\Omega}. \quad (2)$$

Далее из (2) формируется маска антропогенных зон изображения $I(x, y)$

$$P(x, y) = \begin{cases} 1, & \text{если } (F_1(x, y) > \mu_1 + 3\sigma_1) \cup (F_2(x, y) > \mu_2 + 3\sigma_2), \\ 0, & \text{иначе,} \end{cases} \quad (3)$$

где $\mu_{1,2}$ — средние, а $\sigma_{1,2}$ — среднеквадратические отклонения массивов $F_{1,2}(x, y)$ в зоне естественного ландшафта (соответственно для функций отклика “угол” и “край”).

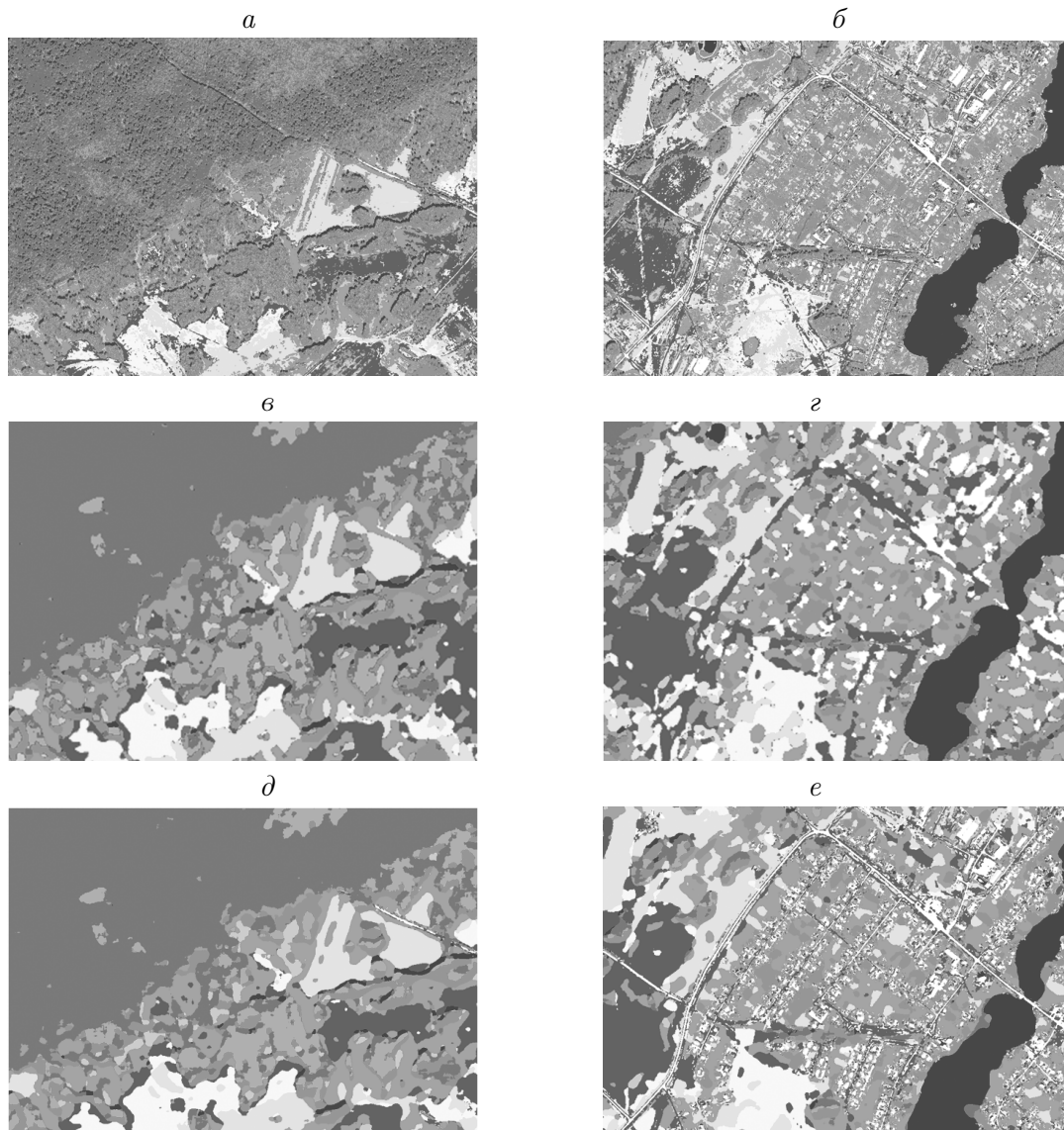


Рис. 1. Результаты классификации для природных и антропогенных зон: *a, б* — спектральная классификация; *в, г* — постобработка с постоянным размером окна; *д, е* — локально-адаптивная классификация

На третьем этапе с учётом (3) выполняется адаптивная процедура постклассификации

$$R(x, y) = \begin{cases} \left[\hat{I}(x, y) \right]_{15 \times 15}, & \text{если } P(x, y) = 0, \\ \left[\hat{I}(x, y) \right]_{3 \times 3}, & \text{если } P(x, y) = 1, \end{cases} \quad (4)$$

где $[\hat{I}(x, y)]$ означает процедуру выбора наиболее часто встречающегося класса в картосхеме $\hat{I}(x, y)$ по окну с координатами центра x, y и размером $n \times n$.

На рис. 1, *д, е* представлен окончательный результат локально-адаптивной классификации исходного изображения. Полученная согласно (4) картосхема сглажена в природной зоне (рис. 1, *д*) и в то же время с необходимой точностью передает классовый состав антропогенных территорий (рис. 1, *е*).

2. Обнаружение незначительных изменений в поле наблюдения

Типичная процедура обнаружения изменений состоит из классификации пары геометрически согласованных разновременных изображений и выявления пикселей, отнесённых к различным классам. Однако, как отмечалось выше, для естественных ландшафтов повышение разрешения отрицательно сказывается на качестве сегментации. По этой причине при обнаружении незначительных изменений с учётом различий в условиях освещённости, состоянии атмосферы, естественной суточной и сезонной изменчивости подобные методы оказываются низкоэффективными. В качестве альтернативы предлагается попиксельный разностный метод, использующий нормализацию изображений на основе поблочного согласования динамических диапазонов яркости, а также построение и анализ разностных кадров на основе оценки согласованности изменения во времени одинаковых по яркости пикселей изображения [4]. При этом формирование разностного кадра для сравниваемых изображений $I_1(x, y)$ и $I_2(x, y)$ осуществляется также поблочно. Для этого определяются и анализируются двумерные диаграммы изменения яркости $P(i, j)$, отображающие количество пикселей, которые в изображении $I_1(x, y)$ имеют яркость i , а в $I_2(x, y)$ — яркость j . Каждое сечение i такой диаграммы представляет собой распределение яркости пикселей в $I_2(x, y)$, имеющих яркость i в $I_2(x, y)$ (гистограмма прямого разброса). Перпендикулярное же сечение j представляет собой распределение яркости пикселей в $I_1(x, y)$, имеющих яркость j в $I_2(x, y)$ (гистограмма обратного разброса).

Для каждого уровня яркости i изображения $I_1(x, y)$ по сформированной диаграмме изменения яркости $P(i, j)$ выполняется следующая процедура:

- в $I_2(x, y)$ определяется распределение яркости пикселей, имеющих заданную яркость в $I_1(x, y)$ (гистограмма прямого разброса);
- по этой гистограмме находится наиболее часто встречающаяся яркость, и в $I_1(x, y)$ определяется распределение яркости пикселей, имеющих данную яркость в $I_2(x, y)$ (гистограмма обратного разброса);
- определяется ширина гистограммы обратного разброса по уровню полуспада в сторону увеличения яркости для почвенных каналов и уменьшения для вегетационных индексов;
- по гистограмме прямого разброса выделяются пиксели, отклонившиеся от максимума более чем на ширину гистограммы обратного разброса.

В случае отсутствия изменений все пиксели одинаковой яркости первого изображения имеют близкую яркость и во втором. При наличии антропогенных воздействий разброс их яркости увеличивается. Ширина же гистограммы обратного разброса определяется аппаратными погрешностями системы регистрации, а также естественными суточными и сезонными изменениями и может быть использована в качестве величины допустимого отклонения. В результате обработки разновременных изображений с применением предложенной процедуры происходит выделение пикселей с нетипичным изменением яркости в каждом из выбранных спектральных каналов. При этом удаётся избежать характерных недостатков разностных методов, связанных с необходимостью экспериментального подбора пороговых значений [5].

Продемонстрируем предложенный метод обнаружения незначительных изменений, вызванных антропогенным воздействием, на примере поиска выборочных рубок Караканского бора (Новосибирская обл.) по многоспектральным данным спутника SPOT 4. Основной показатель проведения таких рубок — увеличение компоненты излучения,

связанной с отражением от открытых почв, а также появление участков вскрытого грунта. Соответственно наиболее информативны красный (R) и коротковолновый инфракрасный (SWIR) каналы спутника SPOT 4.

На рис. 2, *а* представлен фрагмент изображения от 25 июня 2011 г., на рис. 2, *б* — этот же участок местности, полученный 19 июля 2012 г. после согласования динамических диапазонов яркости и дополнительного контрастирования. Отметим, что исходные фрагменты не приводятся, поскольку с учётом имеющихся полиграфических возможностей они визуалью практически не различимы.

На рис. 3, *а* показана гистограмма прямого разброса для некоторого уровня яркости в первом фрагменте, а на рис. 3, *б* — гистограмма обратного разброса для уровня яркости второго фрагмента, соответствующего максимуму гистограммы прямого разброса (320 пикселей). Удвоенная ширина гистограммы обратного разброса на уровне 160 составила две градации яркости (с интерполяцией и округлением до целых значений). Соответственно порог для гистограммы прямого разброса выбран на уровне 71. Все пиксели, относящиеся к заштрихованной части гистограммы прямого разброса, выделены как претерпевшие изменения.

Данная процедура выполнена для всех уровней яркости первого фрагмента, и сформирована результирующая картосхема (рис. 3, *в*). Сравнивая полученные отметки с ис-

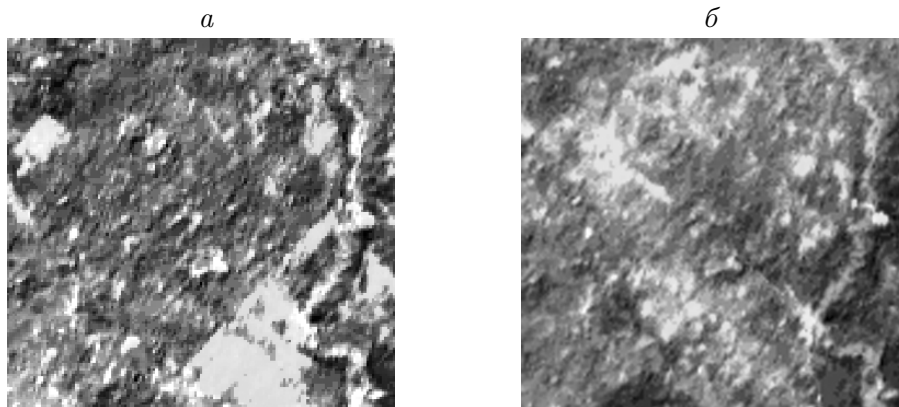


Рис. 2. Фрагмент изображений после согласования динамических диапазонов яркости и дополнительного контрастирования

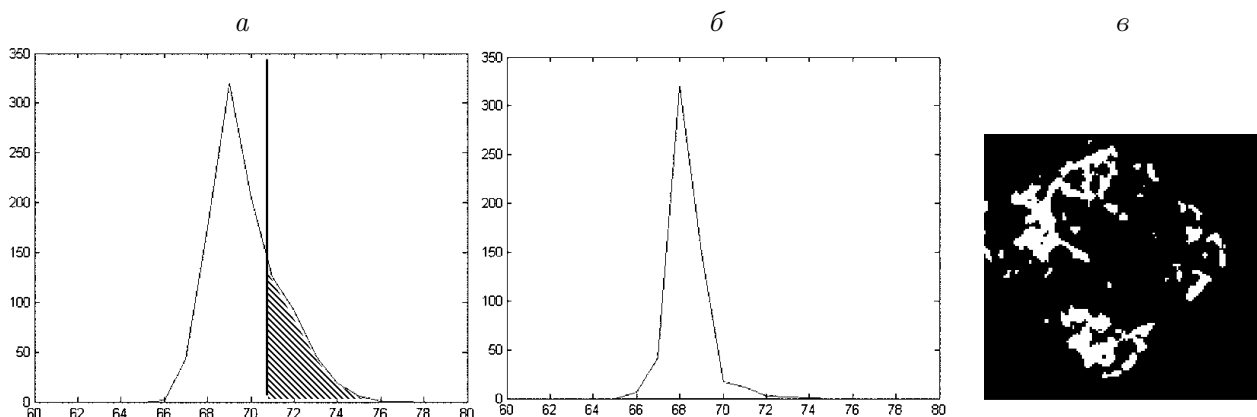


Рис. 3. Формирование картосхемы изменений: *а*, *б* — гистограммы прямого и обратного разбросов, *в* — обнаруженные изменения

ходными разновременными изображениями (см. рис. 2), можно видеть, что произошло выделение участков, на которых вследствие проведённых рубок компонента излучения, связанная с отражением от почвы, увеличилась.

3. Обработка данных гиперспектральной съёмки

Современное развитие средств ДЗЗ характеризуется активным внедрением технологий гиперспектральной съёмки в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах. Отличительной особенностью гиперспектральных данных является узкая ширина спектральных полос и большое количество регистрируемых каналов. Так, разработаны многочисленные подходы, реализующие анализ тонкой структуры спектров пикселей изображений и их классификацию на основе сравнения с эталонными спектральными кривыми. Другой класс алгоритмов, наряду с этим, включает субпиксельный анализ с целью определения доли различных материалов в каждом участке земной поверхности, соответствующем элементу разрешения, путём линейного спектрального разделения. Краткий обзор исследований в данном направлении представлен в [6].

Для повышения эффективности средств обработки данных предложены алгоритмы, основанные на выборе небольшого количества наиболее информативных каналов с последующим применением процедур классификации, разработанных для анализа мультиспектральных данных. Однако все перечисленные выше методы рассматривают обрабатываемые данные не как изображения, а как некоторые независимые спектральные измерения. В качестве наиболее перспективных следует рассматривать подходы, основанные на одновременном анализе спектральных и пространственных признаков [7].

Рассмотрим примеры обработки изображений, полученных при наземных испытаниях гиперспектральной аппаратуры (640 каналов в диапазоне 480–1100 нм). На рис. 4, *а* представлено RGB изображение наблюдаемой сцены. В поле зрения имеются различные типы поверхности: почва, зелёная растительность, угнетённая растительность (вытоптаные участки), эталонные объекты. На рис. 4, *б* приведены спектры отражённого излучения $I(\lambda)$, зарегистрированного от перечисленных типов поверхности.

Для получения спектральных коэффициентов отражения участков реальной сцены необходимо учесть спектральный состав падающего излучения и спектральную чувствительность фотоприёмного устройства. С этой целью выполнена нормировка спектров на излучение от эталонных объектов. На рис. 4, *в* приведены нормированные спектральные коэффициенты отражения $\rho(\lambda)$ от реальных объектов.

Следует отметить, что восстановленные в результате нормировки спектры отражения соответствуют литературным данным, при этом состав регистрируемого излучения участков поверхности с угнетённой растительностью представлен комбинацией спектров зелёной травы и почвы, по соотношению которых можно судить о степени нарушения растительного покрова.

К гиперспектральным данным применимы методы классификации, которые используются для анализа мультиспектральных данных. В частности, представляется перспективным применение предложенных в работе комплексных локально-адаптивных подходов (с учётом спектральных и пространственных признаков). Имеется возможность выявлять узкие линии поглощения, характерные для минеральных веществ, газов и воды, проводить их идентификацию и оценивать концентрацию, а также определять такие спектральные признаки, которые принципиально не могут быть получены при обработке мультиспектральных данных (положение экстремумов спектральной

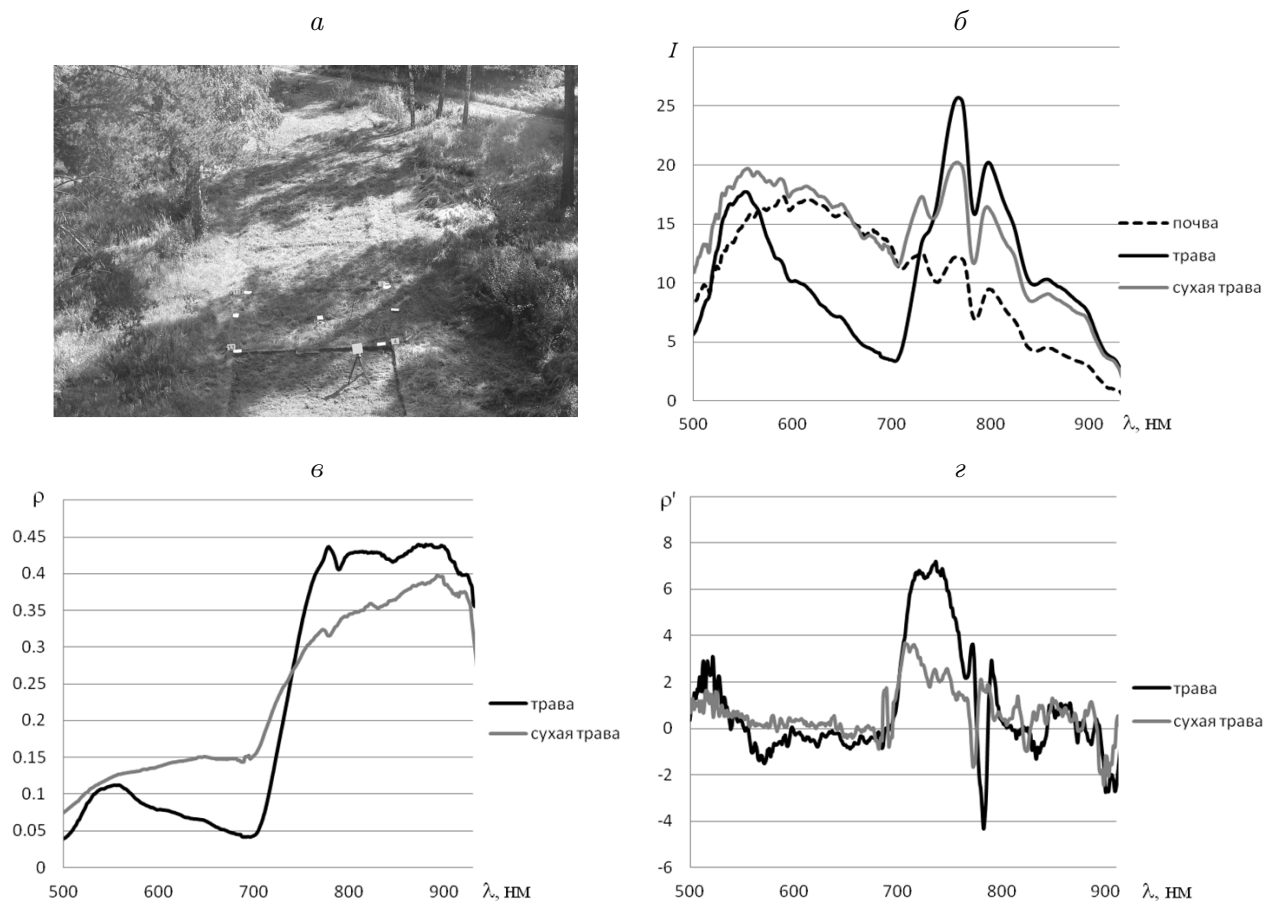


Рис. 4. Обработка гиперспектральных данных: *a* — изображение сцены; *б* — спектры излучения, отражённого от различных поверхностей; *в* — спектральные коэффициенты отражения; *z* — результат их дифференциальной обработки по длине волны

кривой, ширина пиков, точки перегиба и т. п.). Кроме того, целесообразным становится представление и анализ спектральных данных, полученных после дифференциальной обработки по длине волны $\rho'(\lambda)$. Этот подход проиллюстрирован на рис. 4, *z*, где приведены данные для растительности в различном состоянии, позволяющие по положению максимума с высокой точностью определить положение красной границы полосы поглощения хлорофилла. Таким образом, целесообразно формировать базу данных наиболее информативных коэффициентов отражения $\rho(\lambda)$, а затем, в процессе классификации, использовать (совместно с пространственными) небольшое количество специально выбранных гиперспектральных признаков.

Заключение

Предложен метод классификации спутниковых изображений высокого пространственного разрешения, сочетающий обработку спектральных и пространственных признаков. На первом этапе производится классификация исходных изображений по спектральным признакам и формирование пространственных масок для антропогенных зон по характеристикам локальной структуры, а на втором — скользящим окном выполняется процедура выбора наиболее часто встречающегося класса. При этом размер окна

для природных и антропогенных зон выбирается различным. Показано, что применение предложенного метода для данных ДЗЗ высокого разрешения позволяет избежать излишней детализации классифицированных изображений на естественных ландшафтах и обеспечить необходимую точность в антропогенных зонах.

Для обнаружения незначительных пространственных изменений на поверхности Земли, вызванных антропогенным воздействием, разработан метод, основанный на попиксельном формировании разностных кадров за счёт оценки согласованности изменения во времени одинаковых по яркости пикселей изображений с помощью диаграмм прямого и обратного разброса. Эффективность предложенных методов продемонстрирована на примере выделения незначительных антропогенных изменений по временным рядам многодиапазонных изображений со спутника SPOT 4.

В результате анализа многоканального изображения видимого и инфракрасного диапазонов восстановлены спектральные коэффициенты отражения участков реальной сцены. Показана возможность формирования принципиально новых спектральных признаков, а также перспективность обработки данных гиперспектральной съёмки с точки зрения повышения селективности классификации объектов в поле наблюдений.

Список литературы

- [1] LILLESAND T., KIEFER R., CHIPMAN J. Remote Sensing and Image Interpretation. John Wiley & Sons, Inc., 2004. 763 p.
- [2] БОРЗОВ С.М., ПОТАТУРКИН О.И. Обнаружение антропогенных зон на основе поиска пространственных аномалий в крупномасштабных спутниковых изображениях // Автометрия. 2012. № 5. С. 104–111.
- [3] БОРЗОВ С.М., ПОТАТУРКИН А.О. Исследование эффективности пространственных признаков при классификации спутниковых изображений различного масштаба // Вест. НГУ. Сер.: Информ. технологии. 2012. № 3. С. 58–65.
- [4] BROMILEY P., THACKER N., COURTNEY P. Non-parametric image subtraction using grey level scattergrams // Image and Vision Computing. 2002. Vol. 20, No. 9-10. P. 609–617.
- [5] БАРТАЛЕВ С.А., КУРЯТНИКОВА Т.С., СТИБИГ Х.Ю. Методы использования временных серий спутниковых изображений высокого пространственного разрешения для оценки масштабов и динамики вырубок таёжных лесов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Сб. статей под ред. Е.А. Лупяна и О.Ю. Лавровой, Т. II. М.: GRANP polygraph, 2005. С. 217–227.
- [6] PLAZA A., DU Q., BIUCAS-DIAS J. ET AL. Foreword to the special issue on spectral unmixing of remotely sensed data // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2011. Vol. 49, No. 11. P. 4103–4110.
- [7] PLAZA A., BENEDIKTSSON J.A., BOARDMAN J.W. ET AL. Recent advances in techniques for hyperspectral image processing // Remote Sensing of Environment. 2009. Vol. 113. P. 110–122.

Поступила в редакцию 29 ноября 2013 г.