

Предварительная обработка временных серий изображений Landsat-TM/ETM+ при создании безоблачных композитных изображений местности

Е.И. Белова, Д.В. Ершов

Учреждение Российской академии наук
Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН (ЦЭПЛ РАН)
117997 Москва, ул. Профсоюзная, д. 84/32
E-mail: belova@ifi.rssi.ru

Для решения хозяйственных, экологических и научно-исследовательских задач на региональном и локальном уровнях необходимы актуализированные карты соответствующих масштабов. Наиболее удобным и экономически целесообразным является использование изображений высокого пространственного разрешения тематического картографа Landsat-5 и Landsat-7 благодаря наличию многолетнего архива данных. Однако доступные наборы данных зависят от сезона и состояния атмосферы (облачность, дымка и т.п.) в момент съемки наблюданной территории. Это требует разработки автоматизированных методов и алгоритмов устранения артефактов для формирования качественных композитных изображений.

В статье рассматривается алгоритм предварительной обработки снимков Landsat-5/7, включающий этапы фильтрации облачности, слабой дымки, теней от облаков, дымов от пожаров, а также атмосферная коррекция изображений. Приводится методика создания изображений – мозаик, включающая в себя фильтрацию остаточной облачности и теней от нее.

Ключевые слова: Landsat-5/7, мозаика, фильтрация облачности, тени от облачности, атмосферная коррекция

Введение

Программа Landsat по исследованию природных ресурсов Земли осуществляется NASA (США) с 1972 года. В настоящее время на околоземной орбите функционируют два спутника: Landsat-5 и Landsat-7. Первый был запущен в 1984 году, второй – в 1999 году. После 2003 года из-за технической неполадки оборудования на спутнике Landsat-7 изображения, полученные с него, поступают с потерей данных. Разрешающая способность приборов составляет 30 метров в многоспектральном режиме, в полосе шириной 190 км. Периодичность наблюдения одной и той же территории в надир составляет один раз в 16 дней. В настоящее время оба спутника функционируют, однако поставляют разного качества данные съемки земной поверхности (<http://landsat.gsfc.nasa.gov/>).

Низкая периодичность съемки одной и той же территории спутниками высокого разрешения Landsat и SPOT по сравнению со спутниками среднего пространственного разрешения Terra/Aqua-MODIS (ежедневная съемка), а также частая облачность территории России требуют разработки соответствующих методов и алгоритмов сбора, подготовки и тематического анализа данных высокого пространственного разрешения.

Современные технологии обработки и анализа космических снимков для решения прикладных задач являются многошаговым автоматизированным процессом, разделяющимся на этапы подготовки спутниковых снимков и их тематический анализ (П. Потапов и др., 2010).

Подготовка космических снимков высокого разрешения предусматривает несколько этапов предварительной обработки, включая (рис. 1):

- Формирование временных серий спутниковых данных на территорию наблюдения из многолетних архивов.

- Фильтрацию объектов на снимках, искажающих изображение местности, а именно: облачность, слабая дымка, тени от облаков, дымы от пожаров и другие.
- Коррекцию спектрально-отражательных яркостей земной поверхности за атмосферу.
- Формирование спутниковых снимков – мозаик с пространственным разрешением 30м, собранных из временных серий

Подготовка данных

Данные Landsat-5/7 были отобраны в каталоге геологической службы США (USGS) (<http://www.usgs.gov/>) при помощи интерфейса «EarthExplorer» (<http://edcns17.cr.usgs.gov/NewEarthExplorer/>). Для апробации метода были отобраны снимки на территорию Московской области за летний сезон 2010 года, а также на территорию Иркутской области за летние сезоны в период с 2006 по 2010 год.

Реализация метода проводилась в программной среде ERDAS Imagine.

Выделение маски облачности

Импорт спектральных каналов спутникового изображения производится автоматически средствами ERDAS Imagine.

Маскирование облачности выполняется с использованием первого (синий) канала в видимом диапазоне (0.45 – 0.515 мкм) и шестого канала в тепловом диапазоне (10.40 – 12.5 мкм) электромагнитного спектра.

Наличие облачного покрова в зависимости от процента его покрытия приводит к изменению формы гистограммы. Она приобретает бимодальный или много модальный вид. Это связано с тем, что плотная облачность имеет сильное отражение в видимом диапазоне и на снимках выглядит белым цветом или оттенками серого цвета.

В тепловом диапазоне прибор регистрирует собственное тепловое излучение объектов земной поверхности, интенсивность которого обусловлена тепловым состоянием объекта местности. В тепловом диапазоне температура поверхности значительно выше температуры облачности в разных слоях атмосферы. Этот признак используется для выделения облачного покрова по отношению к нагретой поверхности в летние периоды вегетационного сезона. Гистограмма также приобретает много модальный вид. Это приводит к тому, что среднее значение для этих каналов смещается на гистограмме по направлению к облачности.

В связи с этим, алгоритм выполняет выделение облачности в два этапа. Первоначально определяются средние значения для распределений яркостей в видимых и тепловом каналах. Затем для последующего анализа сохраняются значения яркостей в обоих каналах, которые удовлетворяют следующим условиям:

– для видимого канала:

$$V'_1 = \begin{cases} 0, & \text{если } V_1(i) \geq \bar{V}_1 \text{ и } 0 > V_6(i) \leq \bar{V}_6 \\ V_1(i) & \end{cases} \quad (1)$$

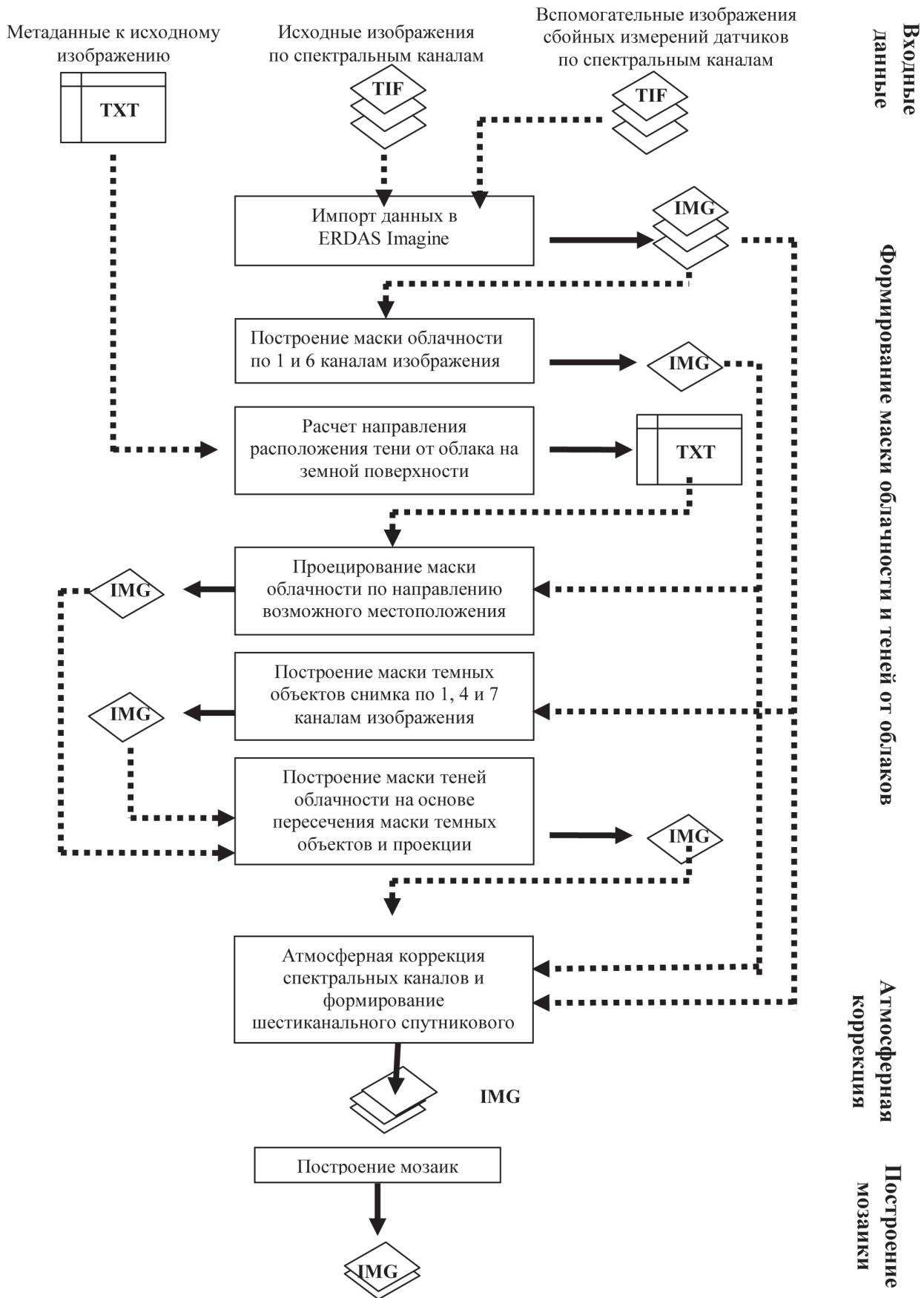


Рис. 1. Общая схема тематической обработки временных серий спутниковых изображений

– для теплового канала

$$V_6' = \begin{cases} 0, & \text{если } V_1(i) \geq \bar{V}_1 \text{ и } 0 > V_6(i) \leq \bar{V}_6 \\ V_6(i) & \end{cases}, \text{ где} \quad (2)$$

$V_i(i)$ – значения яркости i -го пикселя в видимом канале;

$$\bar{V}_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_1(i), \text{ для } \forall V_1(i) \neq 0 \text{ – среднее значение распределения яркостей видимо-}$$

го канала. При расчете не учитываются нулевые значения.

$V_6(i)$ – значения яркости i -го пикселя в тепловом канале;

$$\bar{V}_6 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_6(i), \text{ для } \forall V_6(i) \neq 0 \text{ – среднее значение распределения яркостей теплово-}$$

го канала. При расчете не учитываются нулевые значения.

На втором этапе выполняется расчет стандартного отклонения для каждого из выше-перечисленных каналов:

$$\sigma_1 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n V_1(i) - \bar{V}_1}{n}} \text{ для } \forall V_1(i) \neq 0, V_1'(i) \leq Me_1 \quad (3)$$

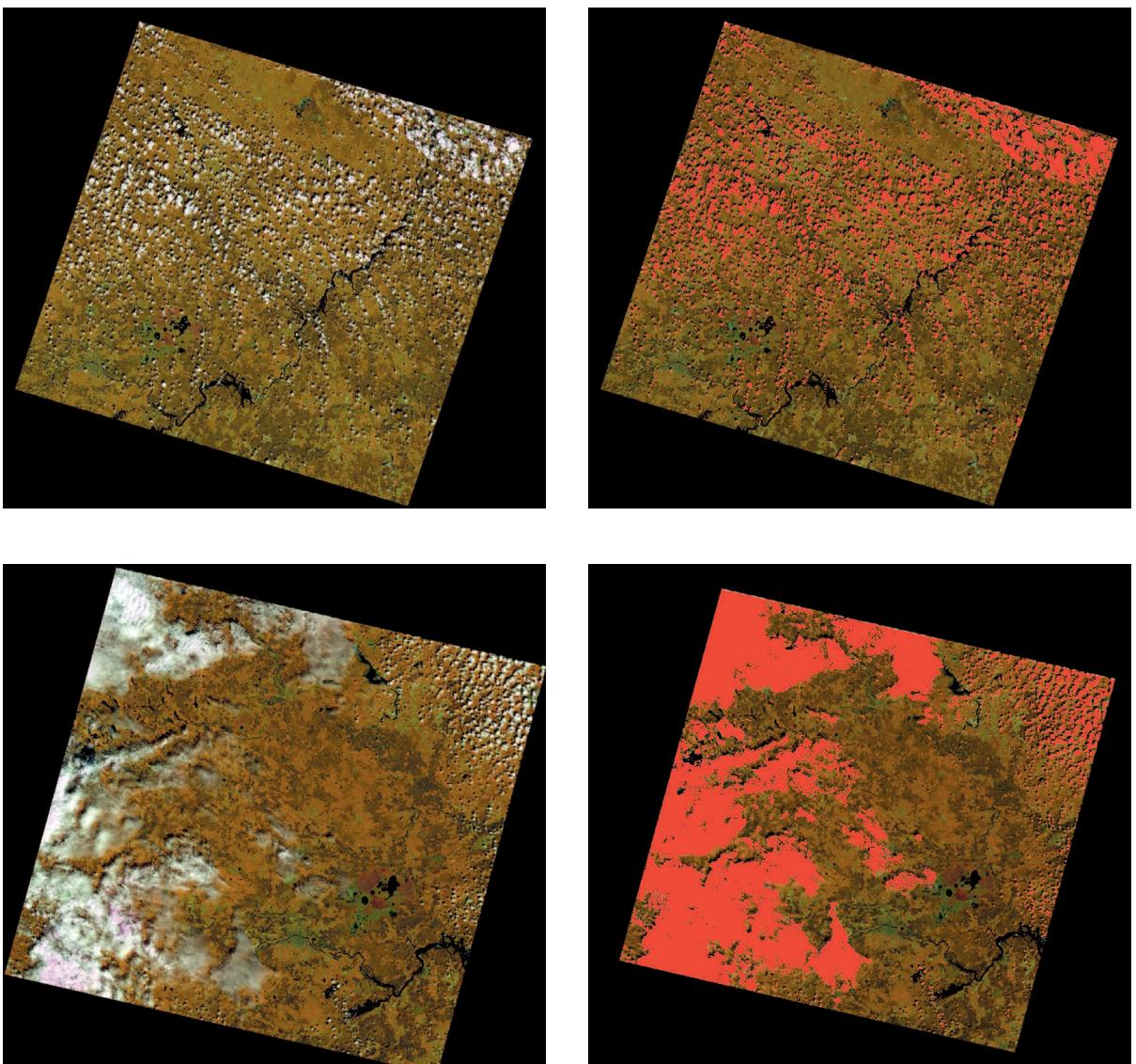
σ_1 – стандартное отклонение распределения яркостей видимого канала. При расче-те не учитываются нулевые значения, а также значения, превышающие медиану Me_1 гисто-грамм распределения яркостей видимого канала.

$$\sigma_6 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n V_6(i) - \bar{V}_6}{n}} \text{ для } \forall V_6(i) \neq 0, V_6'(i) \geq Me_6 \quad (4)$$

σ_6 – стандартное отклонение распределения яркостей теплового канала. При расче-те не учитываются нулевые значения, а также значения, превышающие медиану Me_6 гисто-грамм распределения яркостей теплового канала.

Окончательно маска облачности M_{cld} формируется исходя из следующих условий (рис. 2):

$$M_{cld} = \begin{cases} 1, & \text{если } V_1(i) \geq (Me_1 + 2 \cdot \sigma_1), V_6 \neq 0, V_6 \leq (Me_6 - 2 \cdot \sigma_6) \\ 0 & \end{cases} \quad (5)$$



*Рис. 2. Примеры маскирования облачности на снимках Landsat
вышеописанным алгориттом (комбинация каналов: красный – ближний ИК,
зеленый – средний ИК, синий – красный канал)*

Формирование маски теней от облаков

Следующим этапом предварительной обработки снимков высокого пространственного разрешения является выделение маски теней от облаков. Многошаговая операция состоит из:

- расчета направления расположения тени от облака на земной поверхности.
- построения маски темных объектов снимка по 1 ($0.45 - 0.515$ мкм), 4 ($0.75 - 0.90$ мкм) и 7(средний ИК: $2.09 - 2.35$ мкм) каналам изображения Landsat
- проецирование маски облачности по направлению возможного местоположения тени
- построение маски теней облачности на основе пересечения маски темных объектов и проекции облачности

Определение направления расположения тени от облака выполняется на основе информации о взаимном положении спутника и Солнца в момент съемки наблюдаемой терри-

тории. В состав входят такие параметры как зенитный и азимутальный углы Солнца, зенитный угол и азимут наблюдения прибора, и географические координаты сцены Landsat. Расчет расстояния в декартовой системе координат (x,y) спутникового изображения выполняется по упрощенным формулам:

$$\begin{aligned} L_x &= \tan(h) \cdot \sin(A) \\ L_y &= -\tan(h) \cdot \cos(A), \end{aligned} \quad (6)$$

где h – высота стояния Солнца (отчитывается от вертикальной оси); является обратным углом зенитному углу Солнца, который отчитывается от горизонта;

A – азимутальный угол положения Солнца.

Однако из-за того, что высота облачного покрова в момент съемки неизвестна, на изображении выполняется выделение темных объектов, потенциально похожих на тени от облаков. Для этого используются синий (1 канал), ближний (4 канал) и средний инфракрасный каналы (7 канал). Первоначально рассчитываются комбинации каналов, представляющие собой отношения синего и ближнего ИК каналов и синего и среднего ИК каналов:

$$A = \frac{V_1}{V_4} \text{ и } B = \frac{V_1}{V_7} \quad (7)$$

Затем выполняется расчет среднего и стандартного отклонения для изображений A и B , на основе которых производится первичная фильтрация значений яркостей пикселов изображения, не удовлетворяющих следующим условиям:

$$A' = \begin{cases} 0, \text{ если } A(i) \geq (\bar{A} + 2 \cdot \sigma_A) \text{ и } \frac{\bar{A}}{\sigma_A} < 2 \\ A(i) \end{cases} \quad (8)$$

$$B' = \begin{cases} 0, \text{ если } B(i) \geq (\bar{B} + 2 \cdot \sigma_B) \text{ и } \frac{\bar{B}}{\sigma_B} < 2 \\ B(i) \end{cases} \quad (9)$$

Затем повторно определяются значения среднего и стандартного отклонения для изображений A' и B' , на основе которых производится маскирование темных объектов, удовлетворяющих следующим условиям:

$$M_{drk} = \begin{cases} 0, \text{ если } A'(i) \geq (\bar{A}' + 2 \cdot \sigma_{A'}), B' \geq (\bar{B}' + 2 \cdot \sigma_{B'}) \\ 1 \end{cases} \quad (10)$$

С помощью формул определяются расстояние, и направление смещения маски облачности M_{cld} для поиска возможного местоположения тени M_{drk} . Смещение маски облачности осуществляется до тех пор, пока пространственно эти две маски не пересекутся на расстоянии не превышающее 5 км.

Построение маски теней облачности осуществляется на основе пересечения маски темных объектов и проекции облачности:

$$M_{shd} = M_{cld} \cap M_{drk} \quad (11)$$

Итак, полученные маски облачности M_{cld} и теней от облаков M_{shd} (рисунок 3) вместе с исходным изображением поступают в блок атмосферной коррекции.

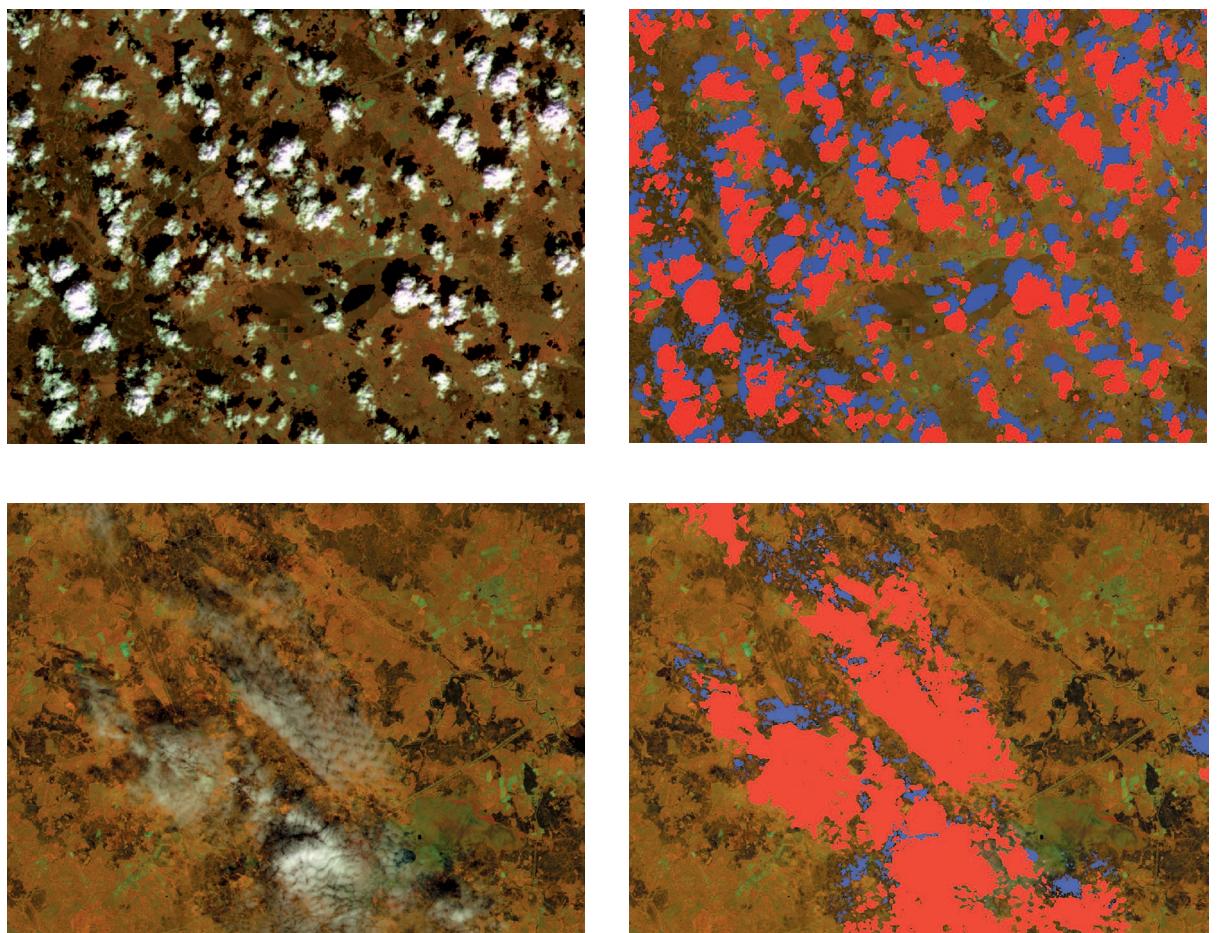


Рис. 3. Примеры маскирования облачности и теней от нее на снимках Landsat (комбинация каналов: красный – ближний ИК, зеленый – средний ИК, синий – красный канал)

Атмосферная коррекция спектральных каналов и формирование шестиканального спутникового изображения

Атмосферная коррекция проводится на основе стандартного метода атмосферной коррекции, предложенного в 90-у годы для Landsat-5 (Pat S. Chavez, Jr., 1988, 1989, 1996).

По формуле (39) преобразуются значения яркости пикселов спутникового изображения в значения излучения потока солнечных лучей, принимаемого прибором ($B/m^2 \cdot sr \cdot \mu\text{m}$):

$$L_{sat} = \frac{(L_{max\lambda} - L_{min\lambda})}{(Q_{max} - Q_{min})} \cdot (Q_i - Q_{min}) + L_{min\lambda} \quad (12)$$

Затем по формулам (40) определяются теоретические значения дымки в атмосфере:

$$\begin{aligned} L_{haze} &= L_\lambda - L_{1\%} \\ L_\lambda &= \frac{(L_{max\lambda} - L_{min\lambda})}{(Q_{max} - Q_{min})} \cdot Q_{cal} + L_{min\lambda}, \text{ где} \\ L_{1\%} &= \frac{0.01 \cdot d^2 \cdot \cos^2 \Theta}{ESUN} \end{aligned} \quad (13)$$

Q_{max} – максимальное калиброванное значение яркости (DN), которое соответствует L_{max} – максимальной спектральной яркости излучения, принимаемой сенсором;

Q_{min} – минимальное калиброванное значение яркости (DN), которое соответствует L_{min} – минимальной спектральной яркости излучения, принимаемой сенсором;

L_{max} , L_{min} – max и min спектральная яркости, принимаемые сенсором для каждого канала свои ($\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{ср} \cdot \text{мкм}$);

Q_i – калиброванное значение яркости пикселов снимка (от 0 до 255);

L_{haze} – константа атмосферной коррекции за дымку для каждого канала ($\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{ср} \cdot \text{мкм}$);

L_λ – спектральная яркость «темного» пикселя для каждого канала ($\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{ср} \cdot \text{мкм}$);

$L_{1\%}$ – спектральная яркость атмосферной дымки для каждого канала ($\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{ср} \cdot \text{мкм}$);

d – расстояние от Земли до Солнца (астрономические единицы);

$ESUN$ – Среднее солнечное экзоатмосферная плотность излучения для каждого канала ($\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{ср} \cdot \text{мкм}$);

$\cos \Theta$ – косинус зенитного угла Солнца

И в заключении коррекция значений яркостей за атмосферу, производится по следующей формуле:

$$\text{REF} = \frac{\Pi \cdot d^2 \cdot (L_{sat} - L_{haze})}{ESUN \cdot \cos \Theta} \quad (14)$$

Исправленные за атмосферу значения пикселов представляют безразмерную величину.

Построение мозаики

Заключительным этапом обработки является построение мозаики за летний сезон. Первоначально для каждого спектрального канала формируются временные серии снимков Landsat-5 (либо Landsat-7), предварительно очищенные от облачности и исправленные за атмосферу.

Затем следует этап дополнительной фильтрации:

- Вычисляется среднее значение (\bar{V}_i) каждого пикселя по временному стеку для каждого спектрального канала
- Вычисляется стандартное отклонение (σ_i) каждого пикселя по временному стеку для каждого спектрального канала.
- Выполняется фильтрация остаточных артефактов:

$$V_i, \text{ если } \bar{V}_i - \sigma_i \leq V_i \leq \bar{V}_i + \sigma_i \quad (15)$$

Далее повторно вычисляется среднее значение каждого пикселя по очищенному от выбросов по временному стеку для каждого спектрального канала. В результате получаем изображение (мозаика) (рис. 4), очищенное от остаточной облачности и теней от нее.

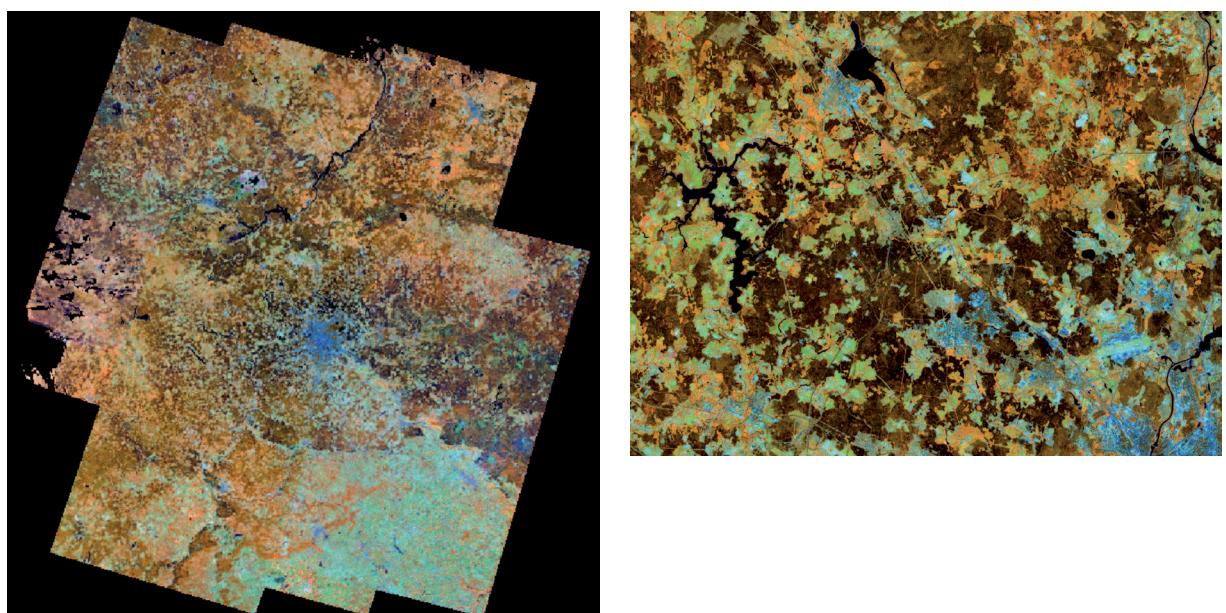


Рис. 4. Пример мозаики на территорию Московской области за лето 2010 года (комбинация каналов: красный – ближний ИК, зеленый – средний ИК, синий – красный)

Заключение

Результатом работы стала автоматизированная методика предварительной обработки изображений Landsat-5/7, а также методика создания мозаик – изображений, собранных из временных серий. Данная методика была успешно апробирована при построении мозаик Московской области за летний сезон 2010 года и Илимского лесничества Иркутской области за летние сезоны периода с 2006 по 2010 годов. Для построения данных мозаик были обработаны 43 и 54 сцены Landsat-5 соответственно. Алгоритм фильтрации облачности и теней от нее был протестирован на 260 изображениях Landsat-5 и Landsat-7.

Литература

1. Peter Potapov, Svetlana Turubanova, Matthew C. Hansen Regional-scale boreal forest cover and change mapping using Landsat data composites for European Russia // Remote Sensing of Environment doi:10.1016/j.rse.2010.10.001
2. Pat S. Chavez, Jr.. An Improved Dark-Object Subtraction Technique for Atmospheric Scattering Correction of Multispectral Data, REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT 24:459-479 (1988), p. 459.
3. Pat S. Chavez, Jr. Radiometric calibration of Landsat Thematic Mapper Multispectral Images, Photogrammetric engineering and remote sensing vol. 55, № 9, September 1989, pp. 1285-1294.
4. Pat S. Chavez, Jr. Image-Based Atmospheric corrections – revisited and improved, Photogrammetric engineering and remote sensing vol. 55, № 9, September 1996, pp. 1025-1036.

Preprocessing Landsat TM/ETM+ Data Sets for Creating Cloud-Free Composite Imagery

E.I. Belova, D.V. Ershov

The Russian Academy of Science Center of Forest Ecology and Productivity
ffiliations
117997 Moscow, 84/32 Profsoyuznaya str.
E-mail: belova@ifi.rssi.ru

For detailed regional assessments of forest ecosystems and studying forest dynamics we have to use high spatial resolution data like Landsat-5/7. The Landsat images are often contaminated with clouds and shadows and we can't use it for creation composite imagery. This requires the development of automated algorithms and techniques to eliminate artifacts and create high-quality composite images. In this paper we describe the cloud and shadows masking approach and demonstrate our cloud-free composite images for a few Russian regions.

Keywords: Landsat5/7, clouds and shadows cleaning, atmosphere correction, mosaic.