

УДК 004.415

## ПРИМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМОВ УЧЕТА ОБЛАЧНОСТИ В ЗАДАЧЕ АТМОСФЕРНОЙ КОРРЕКЦИИ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ ETM+/LANDSAT

Д.В. Соломатов<sup>1</sup>, С.В. Афонин<sup>1</sup>, В.В. Белов<sup>1,2</sup><sup>1</sup>Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, г. Томск<sup>2</sup>Томский государственный университет

E-mails: solomatov@iao.ru; afonin@iao.ru; belov@iao.ru

Рассматриваются вопросы атмосферной коррекции спутниковых измерений в видимой области спектра. Проведен анализ существующего программного обеспечения для атмосферной коррекции данных широко используемых спутниковых систем, их преимуществ и недостатков. Представлена архитектура программного комплекса для атмосферной коррекции спутниковых измерений. Рассматривается реализация алгоритмов получения облачной маски и удаления полупрозрачной облачности на примере снимка, полученного прибором ETM+ со спутника Landsat7.

### Ключевые слова:

Алгоритмы, спутниковые данные, атмосферная коррекция, облачность, программное обеспечение.

### Key words:

Algorithms, satellite data, atmospheric correction, cloudiness, software.

Данные спутникового зондирования земной поверхности, получаемые в спектральном диапазоне 0,4...2,1 мкм, имеют широкое применение для решения целого спектра научных и прикладных задач. В настоящее время широко используются спутниковые данные различного пространственного разрешения, такие как NOAA POES, EOS/MODIS, SPOT, EOS/Aster, Landsat и другие. Однако спутниковые измерения подвержены значительному влиянию различных искажающих факторов: поглощение излучения атмосферными газами, релеевское рассеяние, ослабление и рассеяние излучения аэрозолями и облачностью, процесс бокового подсвета (*adjacency effect*) с учетом рельефа местности. Для учета этих факторов осуществляется атмосферная коррекция (АК) спутниковых измерений. Задача атмосферной коррекции заключается в вычислении указанных искажающих факторов, исключении их из оптического сигнала, измеряемого на спутнике, и восстановлении спектральной отражательной способности земной поверхности  $\rho_i$ .

Для первичной и тематической обработки спутниковых данных разработано соответствующее программное обеспечение. Например, для атмосферной коррекции данных MODIS используется программа [1], разработанная в Direct Readout Laboratory (DRL) GSFC/NASA (Goddard Space Flight Center, NASA). Однако в этой программе учитывается только молекулярно-аэрозольное поглощение и рассеяние, а процесс бокового подсвета игнорируется. На сайте спутниковой системы SPOT пользователи могут получать данные, которые прошли только радиометрическую и геометрическую коррекцию, но без учета атмосферных искажающих факторов. Рекомендательный для атмосферной коррекции данных SPOT метод SMAC (Simplified Method for the Atmospheric Correction) [2] также учитывает только молекулярное и аэрозольное рассеяние и поглощение.

В тоже время для достижения максимальной точности при атмосферной коррекции спутниковых данных должен быть применен подход, где принимается во внимание оптико-метеорологическое состояние атмосферы, геометрия наблюдений и рельеф поверхности [3, 4]. Например, для проведения коррекции спутниковых данных в случае плоской земной поверхности предполагается выполнение следующих этапов:

- создание облачной и водной масок;
- удаление солнечной дымки и полупрозрачной облачности;
- компенсация эффектов затенения;
- определение метеорологической дальности видимости или аэрозольной оптической толщины;
- восстановление содержания водяного пара в атмосфере;
- расчет таблиц оптических характеристик атмосферы (Look-Up-Table, LUT) с целью быстрого учета молекулярного и аэрозольного поглощения и рассеяния при проведении АК;
- вычисление функции размытия точки (ФРТ) и учет процесса бокового подсвета;
- восстановление отражательной способности земной поверхности.

В случае рельефной поверхности алгоритм атмосферной коррекции содержит те же этапы, но на каждом из них добавляется учет данных из цифровой модели рельефа.

Существуют коммерческие программные средства атмосферной коррекции, такие как, ATCOR, ACORN, FLAASH, использующие в своей основе программы решения задач переноса излучения (напр., MODTRAN или 6S), которые позволяют учитывать большинство искажающих факторов. Однако перечисленные программные средства являются платными и распространяются без исходных кодов, что не позволяет осуществлять их доработку и развитие с использованием новых теорети-

ческих и информационных разработок в области решения задачи атмосферной коррекции.

В этой связи возникает необходимость реализации программных средств атмосферной коррекции спутниковых измерений в видимой области спектра, которые были бы лишены указанных недостатков.

Учитывая, что общая схема обработки данных одинакова для разных спутниковых систем, целесообразно построение программного комплекса по модульному принципу. В этом случае блоки чтения данных и специфичные для разных спутниковых систем функции реализуются в отдельных модулях, а общие функции, основная логика работы ПК и общая часть графического интерфейса — в главном приложении. Благодаря такому подходу программный комплекс становится расширяемым, появляется возможность добавления новых алгоритмов обработки и поддержки новых форматов данных. Архитектура такого программного комплекса приведена на рис. 1.

Представленный программный комплекс построен по модульному принципу с использованием абстрактных интерфейсов для взаимодействия между его компонентами. Благодаря этому блоки чтения и обработки данных не зависят друг от друга и от управляющего приложения. Такой подход позволяет добавлять в программный комплекс новые блоки для поддержки других спутниковых систем или новые реализации алгоритмов коррекции без изменений остальных частей программного комплекса.

В процессе атмосферной коррекции на первом этапе «Входные данные» (калиброванные спутниковые измерения) с помощью «Блока чтения данных» преобразуются в универсальный формат для последующей коррекции. При таком подходе вся

информация о структуре и процедуры конвертации форматов файлов разных спутниковых систем локализуются в «Блоках чтения данных», а остальные части программного комплекса не зависят от формата входной информации.

Непосредственное использование модели переноса излучения для атмосферной коррекции каждого пикселя — это трудоемкая процедура, которая не может быть использована в оперативном режиме. Для увеличения скорости в данной архитектуре атмосферная коррекция производится по заранее рассчитанным таблицам LUT. Для этих целей используется входящая в состав программного комплекса программа расчета LUT, которая производит необходимые вычисления по заданным спектральным характеристикам канала с помощью модели переноса излучения.

На основе блоков получения информации об оптико-метеорологическом состоянии атмосферы определяются необходимые атмосферные параметры (облачная маска, характеристики аэрозоля и облачности). В связи с тем, что для разных спутниковых систем применяются различные алгоритмы восстановления атмосферных характеристик, в архитектуре программного комплекса предусмотрена возможность использования нескольких блоков получения информации об оптико-метеорологическом состоянии атмосферы, каждый из которых обеспечивает поддержку конкретного спутникового прибора.

На заключительном этапе в блоках атмосферной коррекции производится учет искажающего влияния атмосферы с использованием информации об её оптико-метеорологическом состоянии на основе таблиц характеристик АК. Благодаря независимости этих блоков от форматов входных данных и способа получения информации об оп-

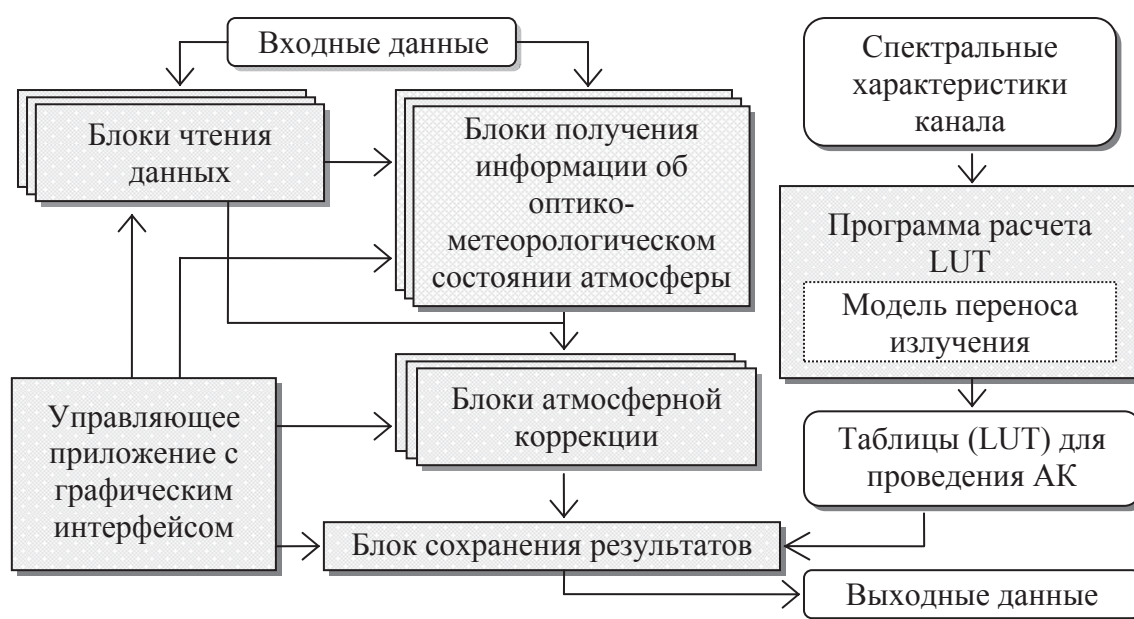


Рис. 1. Архитектура программного комплекса

тико-метеорологическом состоянии атмосферы становится возможным унифицированный подход к атмосферной коррекции данных разных спутниковых систем.

Наличие на спутниковом снимке плотной и полупрозрачной облачности может значительно повлиять на значения, измеренные в видимых каналах прибора. Так, плотная облачность практически не оставляет возможности получить измерения характеристик поверхности, а полупрозрачная облачность может значительно исказить сигнал.

В этой связи первым и одним из самых важных этапов атмосферной коррекции является обнаружение на снимке облачности. Этот процесс разбит на 2 стадии. На первой стадии производится поиск на снимке плотной облачности и строится облачная маска. Облачная маска используется для исключения облачных пикселей из дальнейшей обработки. На второй стадии производится поиск полупрозрачной облачности, для которой спутниковые измерения  $\rho_\lambda$  могут быть скорректированы с помощью специального алгоритма.

В данной работе рассматривается реализация алгоритмов построения облачной маски и удаления полупрозрачной облачности в рамках создаваемого программного комплекса и результаты их применения на примере спутникового снимка, полученного прибором ETM+ со спутника Landsat 7 для территории с центром 55,92 с.ш., 78,2 в.д.

С целью получения облачной маски был использован алгоритм ACCA (Automated Cloud Cover Assessment) [5].

Алгоритм состоит из 2 этапов. Первый этап представляет собой набор пороговых тестов в разных спектральных диапазонах (рис. 2). В результате на выходе алгоритма каждому пикселю снимка присваивается одно из четырех состояний: «снег», «облачный», «безоблачный», «неопределенный».

На втором этапе проводится статистический анализ по данным температурного канала 6, расположенного в спектральном диапазоне (10...13 мкм). Для холодной облачности рассчитываются минимум, максимум, среднее, СКО и коэффициент асимметрии по значениям температур в канале 6. Для всех пикселей, признанных на первом этапе облачными, строится гистограмма распределения температур. Температура, соответствующая значению 97,5 % в гистограмме, считается пороговой. Если коэффициент асимметрии положительный, то это значение увеличивается на величину сдвига. Сдвиг вычисляется умножением коэффициента асимметрии на СКО. Далее все пиксели, которые на первом этапе остались «неопределенными», проходят повторную проверку. Если температура ниже порогового значения, пиксель признается облачным, иначе – безоблачным.

Результаты работы программы для участка спутникового снимка ETM+ с наличием плотной

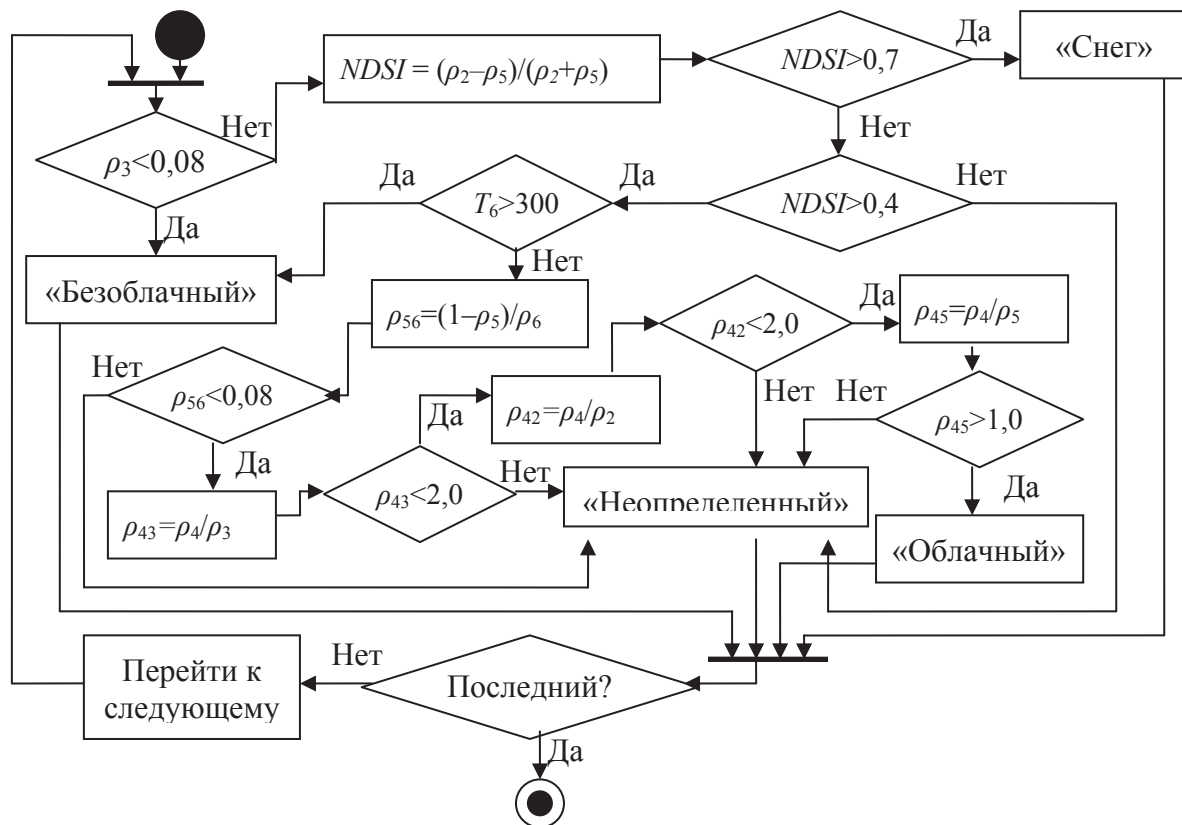


Рис. 2. Алгоритм получения облачной маски (этап 1)

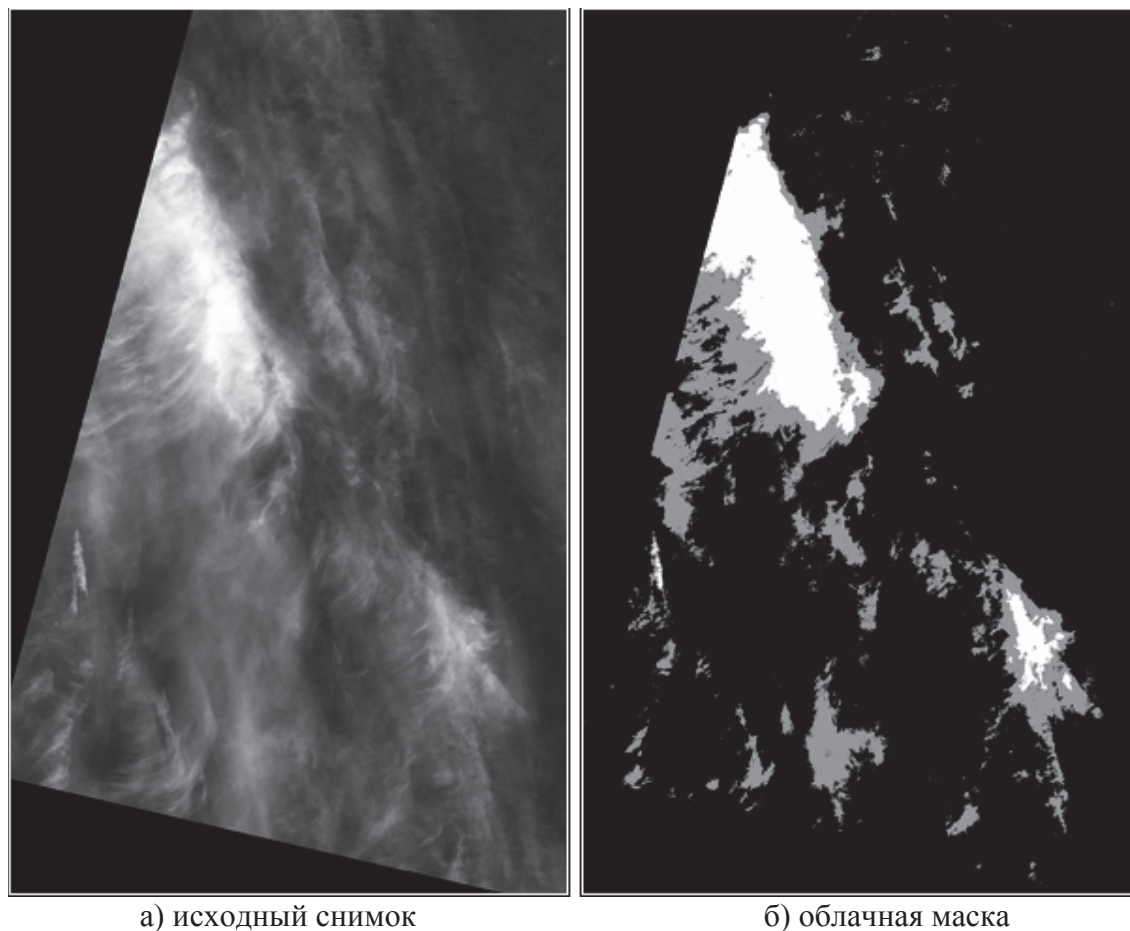


Рис. 3. Облачная маска

облачности представлены на рис. 3. На рис. 3, а, — участок снимка в первом канале прибора (0,450...0,515 мкм), на рис. 3, б, — полученная для этого участка облачная маска. Белым цветом изображена более плотная облачность, серым — менее плотная. Как можно видеть, контуры полученной облачной маски соответствуют визуально наблюдаемым в первом канале контурам облачности.

Полученная облачная маска используется на последующих этапах атмосферной коррекции, и пиксели, которые отмечены как «облачный» или «снег», не участвуют в дальнейших расчетах.

Кроме плотной облачности во многих случаях на спутниковых снимках присутствует солнечная дымка и полупрозрачная облачность. И если пиксели, содержащие плотную облачность, просто отсеиваются, то полупрозрачная облачность и дымка могут интерпретироваться как добавочный искажающий компонент в сигнал, измеренный прибором. Этот компонент должен быть оценен и исключен из общего сигнала.

Алгоритм учета солнечной дымки и полупрозрачной облачности [6] представлен на рис. 4.

Здесь  $DN_i^B$ ,  $DN_i^R$ ,  $x_1$  и  $x_2$  — некалиброванные измерения в канале синего спектрального диапазона (0,450...0,515 мкм), красного спектрального диапазона (0,630...0,690 мкм) и весовые коэффициенты каналов, соответственно. В основе алгоритма лежат преобразования ТС (Tasseled Cap) [7] и HOT (Haze Optimized Transform) [8].

Алгоритм состоит из 5 основных этапов:

1. Определение чистых и замутненных облачностью областей с помощью преобразования ТС. Чистыми считаются пиксели, для которых значение  $TC_i$  меньше среднего значения ( $TC^m$ ).
2. Вычисление линейной регрессии между значениями в синем и красном каналах для чистых пикселей, вычисление угла наклона  $\alpha$  линии регрессии.
3. Замутненные участки ортогональны линии регрессии, таким образом, может быть применено преобразование HOT.
4. Вычисление гистограммы HOT для замутненных областей.
5. Для замутненных пикселей ( $HOT_i > HOT^m$ ) вычисляется поправка  $\Delta_i$  к сигналу и осуществляется его коррекция:  $DN_i(\text{new}) = DN_i - \Delta_i$ .

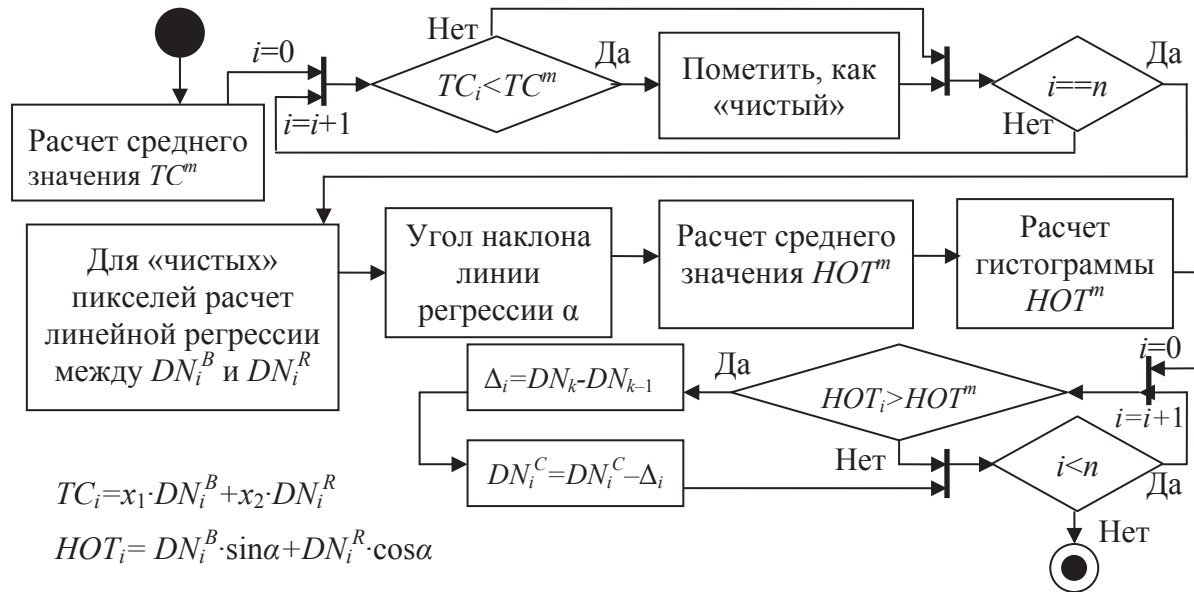


Рис. 4. Алгоритм удаления облачной дымки

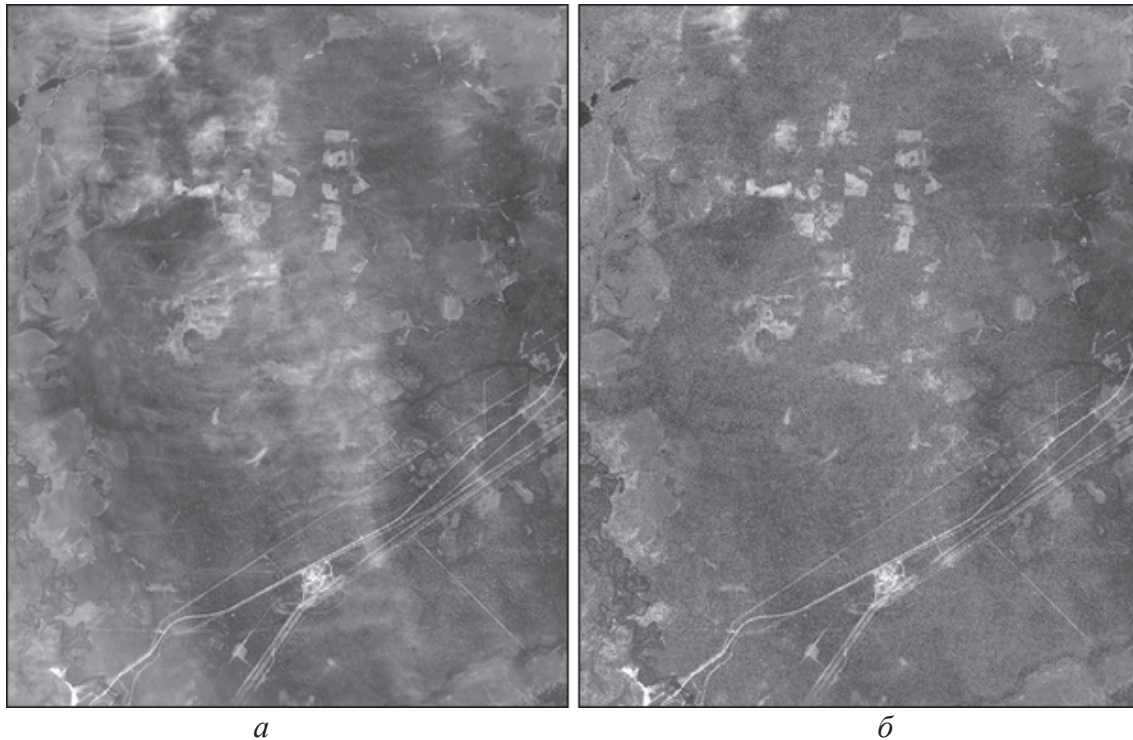


Рис. 5. Удаление полупрозрачной облачности а) исходный снимок; б) результаты работы алгоритма

На рис. 5 приведен пример работы алгоритма учета полупрозрачной облачности для участка спутникового снимка ETM+. Как можно видеть, на исходном снимке (рис. 5, а), главным образом в центральной части, присутствует некоторое количество полупрозрачной облачности, которая закрывает собой поверхность Земли. В результате работы алгоритма (рис. 5, б) большая часть облачности (кроме самой плотной вверху) с изображения исчезла, и стала видна находя-

щаяся под ней структура земной поверхности. После удаления облачности снимок становится пригодным для дальнейших этапов атмосферной коррекции.

Таким образом, в рамках задачи реализации программного комплекса атмосферной коррекции успешно реализованы и апробированы на данных спутниковой системы ETM+/Landsat алгоритмы получения облачной маски и удаления полупрозрачной облачности.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Vermote E.F., Vermeulen A. Atmospheric correction algorithm: spectral reflectances (MOD09) // Algorithm Theoretical Background Document, version 4.0. 1999. URL: [http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd\\_mod08.pdf](http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod08.pdf) (дата обращения 10.09.2012).
2. Rahman H., Dedieu G. SMAC: a simplified method for the atmospheric correction of satellite measurements in the solar spectrum // Int. J. Remote Sensing. – 1994. – V. 15. – P. 123–143.
3. Richter R., Mueller A., Heiden U. Aspects of operational atmospheric correction of hyperspectral imagery // Int. J. Remote Sensing. – 2002. – V. 23. – P. 145–157.
4. Schläpfer D., Richter R. Geo-atmospheric processing of airborne imaging spectrometry data. P. 1. Parametric orthorectification // Int. J. Remote Sensing. – 2002. – V. 23. – P. 2609–2630.
5. Irish R.R., Barker J.L., Goward S.N., Arvidson T. Characterization of the Landsat-7 ETM Automated Cloud-Cover Assessment (ACCA) // Algorithm. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. – 2006. – V. 72. – № 10. – P. 1179–1188.
6. Richter R. Atmospheric correction of satellite data with haze removal including a haze/clear transition region // Computers and Geosciences. – 1996. – V. 22. – P. 675–681.
7. Crist E.P., Cicone R.C. A physically-based transform of Thematic Mapper data – the Tasseled Cap // IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing. – 1984 – V. GE-22. – P. 256–263.
8. Zhang Y., Guindon B., Cihlar J. An image transform to characterize and compensate for spatial variations in thin cloud contamination of Landsat images // Remote Sensing of Environment. – 2002. – V. 82. – P. 173–187.

Поступила 12.09.2012 г.

УДК 004.54

## ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ UNITESK ДЛЯ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО ТЕСТИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СЕТЬЮ ШИРОКОПОЛОСНОГО БЕСПРОВОДНОГО ДОСТУПА СТАНДАРТА IEEE 802.16

И.В. Бойченко, Е.В. Бортников, А.А. Немеров

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники  
E-mail: nemerov@asu.tusur.ru

Описана технология UniTESK и ее применение для функционального тестирования системы управления сетью широкополосного беспроводного доступа (СУ СШБД) стандарта IEEE 802.16 (WiMAX). Показано, что технология UniTESK достаточно проста и эффективна для тестирования событийно-управляемых систем. Рассматривается схема взаимодействия тестирующей и целевой системы.

### Ключевые слова:

Коммуникационный протокол, широкополосный беспроводной доступ, система управления сетью, тестирование программного обеспечения, UniTESK, CTEsk, WiMAX, тестирование.

### Key words:

Communication protocol, broadband wireless access, network management system, software testing, UniTESK, CTEsk, WiMAX, testing.

### Введение

В настоящее время все большее распространение получают сети широкополосного беспроводного доступа. Это распространение вызвано появлением широкого спектра портативных устройств (ноутбуки, смартфоны), а широкополосные беспроводные сети, как известно, позволяют успешно решить проблему «последней мили». Также, беспроводная сеть может быть развернута в географически труднодоступных районах, где прокладка обычной кабельной сети сопряжена со значительными затратами или вообще невозможна.

В общем виде сети широкополосного беспроводного доступа состоят из следующих основных частей: базовых (БС) и абонентских станций (АС), а также оборудования, связывающего базовые станции между собой, с поставщиком сервисов и глобальной сетью Интернет. Для соединения базовой станции с абонентской, как правило, ис-

пользуется высокочастотный диапазон радиоволн.

Стандарт IEEE 802.16 описывает сеть широкополосного беспроводного доступа масштаба города (MAN – Metropolitan Area Network). Коммерческое название сетей, работающих по протоколу 802.16 – WiMAX.

Сеть WiMAX представляет собой совокупность беспроводного и базового (опорного) сегментов. Беспроводной сегмент определен стандартом IEEE 802.16 [1], базовый – определяется спецификациями WiMAX Forum (WMF). Базовый сегмент – это все, что не относится к радиосети, т. е. связь базовых станций друг с другом, связь с локальными и глобальными сетями (в том числе с Интернет). Базовый сегмент основывается на IP-протоколах и стандартах Ethernet (IEEE 802.3). Однако, собственно архитектура сети, включая механизмы криптозащиты, роуминга, хэндовера и т. п., описывается в документах WMF [2]. Стандарт IEEE 802.16 описывает физический и MAC-уровни сети.