

## Построение облачной маски и удаление полупрозрачной облачности на спутниковых снимках ETM+ / Landsat-7

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  
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет  
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36

Поступила в редакцию 13.03.2013 г.

Проведен анализ существующего программного обеспечения для атмосферной коррекции спутниковых данных в каналах видимого диапазона, его преимуществ и недостатков. Представлена архитектура разрабатываемого в Институте оптики атмосферы СО РАН универсального программного комплекса для атмосферной коррекции спутниковых измерений. Рассматривается применение алгоритмов с целью получения облачной маски и удаления полупрозрачной облачности на примере спутниковых снимков прибора ETM+/Landsat-7.

**Ключевые слова:** алгоритмы, спутниковые данные, атмосферная коррекция, облачность, программное обеспечение; 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 (например, [1, 2]). В настоящее время широко используются спутниковые данные различного пространственного разрешения, такие как NOAA POES, EOS/MODIS, NPP/VIIRS, SPOT, EOS/Aster, Landsat и др. Однако спутниковые измерения могут быть подвержены значительному влиянию различных искажающих факторов: поглощение излучения атмосферными газами, рэлеевское 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 в общем случае заключается в вычислении указанных искажающих факторов, исключении их из оптического сигнала, измеряемого на спутнике, и в восстановлении спектральной отражательной способности земной поверхности  $\rho_\lambda$ .

Для первичной и тематической обработки ряда спутниковых данных разработано соответствующее упрощенное программное обеспечение, которое не учитывает всех искажающих факторов. Например, для атмосферной коррекции данных MODIS используется программа [3], разработанная в Direct Readout Laboratory (DRL) GSFC/NASA (Goddard Space Flight Center, NASA). На сайте спутниковой

системы SPOT пользователи могут получать данные, которые прошли только радиометрическую и геометрическую коррекцию, но без учета атмосферных искажающих факторов. Для проведения АК данных SPOT рекомендуется метод SMAC (Simplified Method for the Atmospheric Correction) [4].

### 1. Подход к решению задачи

Для достижения максимальной точности при атмосферной коррекции спутниковых измерений должен быть применен подход, в котором принимаются во внимание оптико-метеорологическое состояние атмосферы, геометрия наблюдений и рельеф поверхности [5, 6]. Например, при проведении коррекции спутниковых данных для 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 толщи;
- восстановление содержания водяного пара в атмосфере;
- расчет таблиц характеристик, необходимых при проведении АК, с целью быстрого учета молекулярного и аэрозольного поглощения и рассеяния;
- вычисление функции размыва 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

\* Дмитрий Владимирович Соломатов (solomatov@iao.ru);

Сергей Васильевич Афонин; Владимир Васильевич Белов (belov@iao.ru).

каждом из них добавляется учет данных из цифровой модели рельефа.

Существуют коммерческие программные средства атмосферной коррекции, такие как ATCOR, ACORN, FLAASH и т.п., использующие в своей основе модели переноса излучения (например, MODTRAN или 6S). К сожалению, эти программы не обеспечивают выполнения с высокой точностью всех этапов коррекции, а их закрытость (перечисленные программные средства являются платными и распространяются без исходных кодов) не позволяет расширение функциональных возможностей программ, добавление новых этапов, новых теоретических и информационных разработок в области атмосферной коррекции и реализацию поддержки других форматов данных.

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

## 2. Архитектура программного комплекса

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 программного комплекса (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 ПК 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 работы с данными других спутниковых систем или создавать новые реализации алгоритмов коррекции без изменений остальных частей ПК.

В процессе атмосферной коррекции на первом этапе «Входные данные» (калиброванные спутниковые измерения) с помощью «Блоков чтения данных» преобразуются в универсальный формат для последующей коррекции. При таком подходе вся информация о структуре и процедуре конвертации форматов файлов разных спутниковых систем локализуется 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 эффективно использована в оперативном режиме. Для увеличения скорости атмосферной коррекции используются таблицы (LUT или Look-Up-Table) характеристик, необходимых для проведения коррекции и полученных заранее для заданных спектральных каналов с помощью модели переноса излучения (например, 6S).

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 ее оптико-метеорологическом состоянии на основе таблиц характеристик, необходимых для АК. Благодаря независимости этих блоков от форматов входных

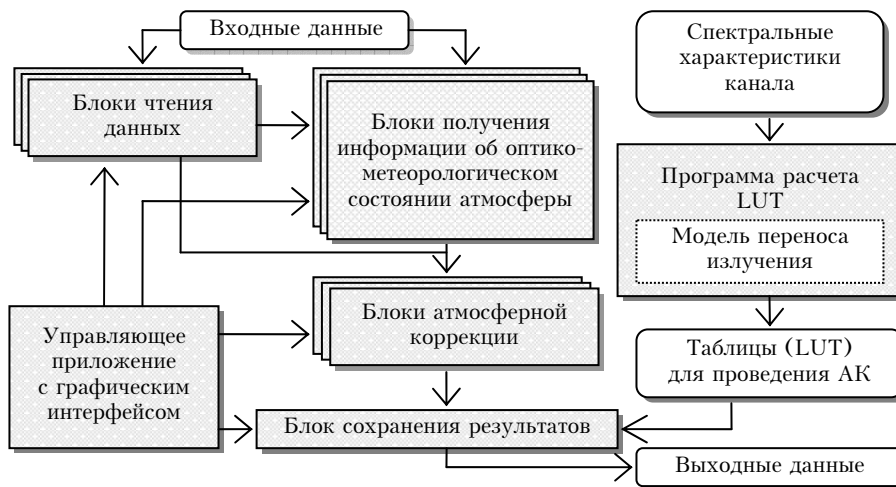


Рис. 1. Архитектура программного комплекса

данных и способа получения информации об оптико-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 измерения, проводимые в видимых каналах прибора. Так, плотная облачность практически не оставляет возможности восстанавливать характеристики земной поверхности, а полупрозрачная облачность может существенно исказить сигнал.

В этой связи первым и важным этапом атмосферной коррекции является обнаружение на снимке облачности. Этот процесс разбит на две 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.

### 3. Иллюстрация применения алгоритмов

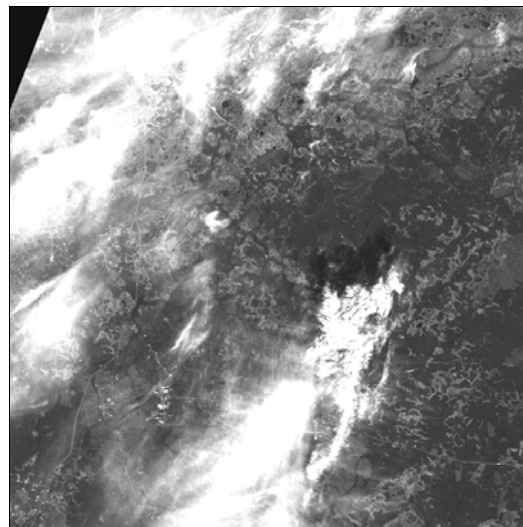
Для иллюстрации работы алгоритмов в качестве примера был выбран спутниковый снимок, полученный 12 июля 2000 г. прибором ETM+ со спутника Landsat-7 для территории с центром 61,47° с.ш., 78,53° в.д. (рис. 2, *a*). На этом снимке присутствуют как плотная, так и полупрозрачная облачность, а также открытые от облачности участки поверхности.

С целью получения облачной маски был использован алгоритм ACCA (Automated Cloud Cover Assessment) [7]. Работа алгоритма организована в два этапа. На первом этапе изображение анализируется с помощью набора пороговых тестов в разных спектральных диапазонах. 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 ИК-канала 6 (спектральный диапазон 10–13 мкм).

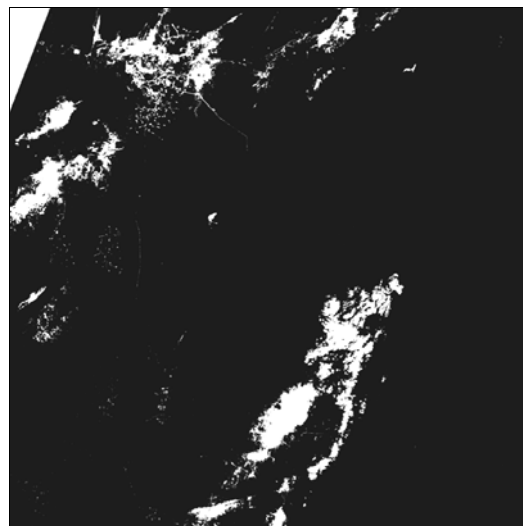
Результаты работы алгоритма облачной маски для участка спутникового снимка ETM+ с наличием плотной облачности представлены на рис. 2. На рис. 2, *a* – участок снимка в первом канале прибора (0,450–0,515 мкм), на рис. 2, *б* – полученная для этого участка облачная маска. Видно, что контуры полученной облачной маски соответствуют визуально наблюдаемым в первом канале контурам облачности.

В дальнейшем пиксели, которые отмечены как «облачный» или «снег», не участвуют в расчетах.

Кроме плотной облачности во многих случаях на спутниковых снимках присутствуют аэрозольная дымка и полупрозрачная облачность. Если при наличии плотной облачности закрытые участки просто исключаются из дальнейшей обработки в связи



*a*



*б*

Рис. 2. Получение облачной маски: *a* – исходный снимок; *б* – облачная маска

с невозможностью получения характеристик поверхности, то полупрозрачная облачность и дымка могут интерпретироваться как добавочные искажающие компоненты в сигнал, измеренный прибором. Эти компоненты должны быть оценены и исключены из общего сигнала.

В основе алгоритма учета полупрозрачной облачности [8] лежат два преобразования:

TC (Tasseled Cap) [9]:

$$TC_i = x_1 DN_i^B + x_2 DN_i^R, \quad (1)$$

где  $DN_i^B$ ,  $DN_i^R$  – целочисленные значения из файла снимка Landsat, соответствующие отражательным способностям в синем и красном каналах соответственно;  $x_1$ ,  $x_2$  – статические коэффициенты; и HOT (Haze Optimized Transform) [10]:

$$HOT_i = DN_i^B \sin \alpha + DN_i^R \cos \alpha, \quad (2)$$

где  $\alpha$  – угол наклона линии регрессии.

В рамках алгоритма для преобразования ТС были определены оригинальные значения коэффициентов  $x_1$  и  $x_2$ , а для безоблачных участков изображения построена линейная регрессия и определен угол наклона  $\alpha$  линии регрессии. Затем для всех точек снимка были получены значения НОТ и построена гистограмма, определяющая величину корректирующей поправки ( $\Delta_i$ ) в зависимости от значения НОТ.

На рис. 3 представлена зависимость поправки в трех первых каналах (0,47, 0,56 и 0,66 мкм) от значения НОТ для рис. 2, а. Коррекция на величину  $\Delta_i$  производится для всех точек снимка, имеющих значение НОТ выше среднего.

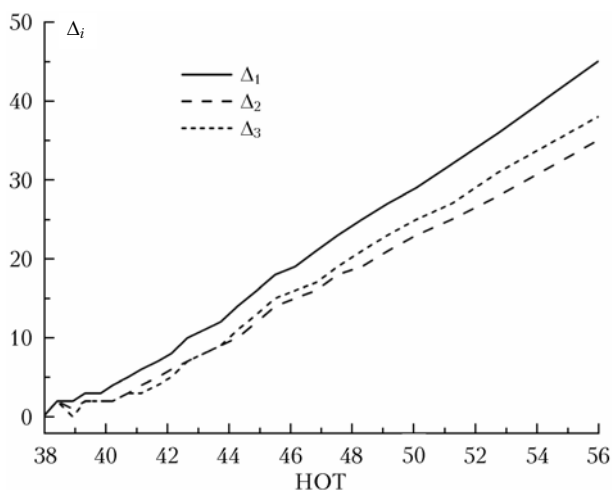


Рис. 3. Зависимость величины корректирующей поправки  $\Delta_i$  в каналах 1–3 от значения НОТ

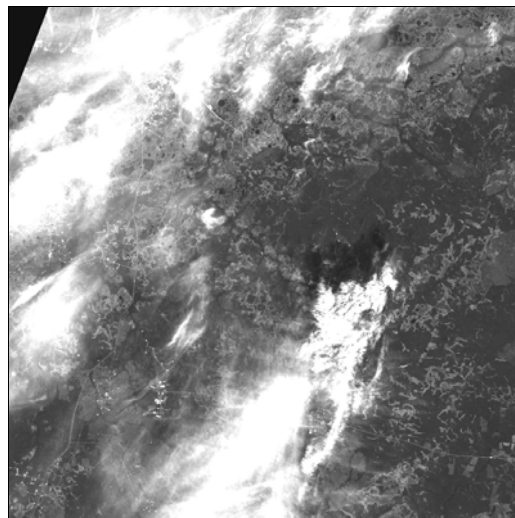
На рис. 4 показано пространственное распределение поправки  $\Delta_1$  в первом канале прибора (0,450–0,515 мкм), иллюстрирующее наличие облачности на участке снимка и ее плотность. Белым цветом показана плотная облачность, определяемая облачной маской. Если сравнивать это пространственное распределение с исходным снимком, то видно, что контуры и плотность облачности в целом согласуются.

На рис. 5 представлены результаты коррекции полупрозрачной облачности для участков двух спутниковых снимков.

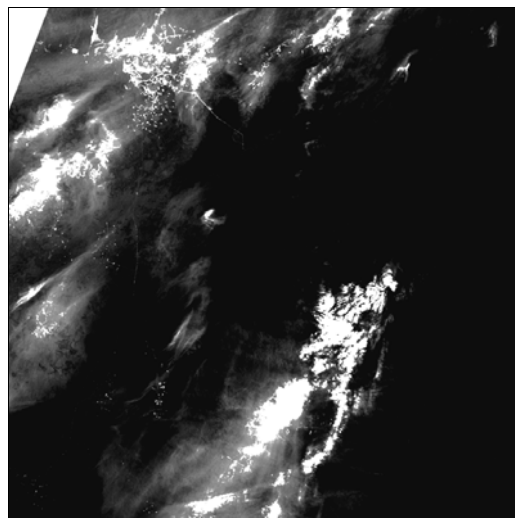
На исходном снимке (рис. 5, а), главным образом в левой части, видно некоторое количество полупрозрачной облачности, которая закрывает собой поверхность Земли. В результате работы алгоритма (рис. 5, б) большая часть облачности (кроме плотной облачности, попавшей в облачную маску) с изображения исчезла и стала видна находившаяся под ней структура земной поверхности. При этом безоблачный участок снимка остался без изменений.

На рис. 5, в, г приведен пример коррекции полупрозрачной облачности для еще одного снимка ETM+/Landsat-7 (рис. 5, в) территории с центром 55,92° с.ш., 78,2° в.д. от 14 мая 2000 г. На участке снимка (рис. 5, в) практически отсутствует плотная облачность, однако значительная часть поверхности участка закрыта полупрозрачной облачностью. В результате коррекции (рис. 5, г) полупрозрачная об-

лачность также была удалена из снимка и стала видна структура находящейся под ней поверхности.



а



б

Рис. 4. Пространственное распределение облачности и корректирующей поправки: а – исходный снимок; б – корректирующая поправка  $\Delta_1$

Для количественной оценки результатов удаления плотной и полупрозрачной облачности были построены гистограммы распределения отражательной способности для снимка (рис. 5, а) до и после коррекции (рис. 6).

После построения облачной маски и исключения плотной облачности общее количество точек уменьшилось на 500 тыс. (6% от общего числа пикселей). При этом высокие значения отражательной способности, соответствующие плотной облачности, исчезли из распределения, а количество и распределение более низких значений не изменились, что может косвенно свидетельствовать о правильной работе алгоритма облачной маски. После удаления полупрозрачной облачности в правой части гистограммы произошел сдвиг от более высоких значений к более низким,

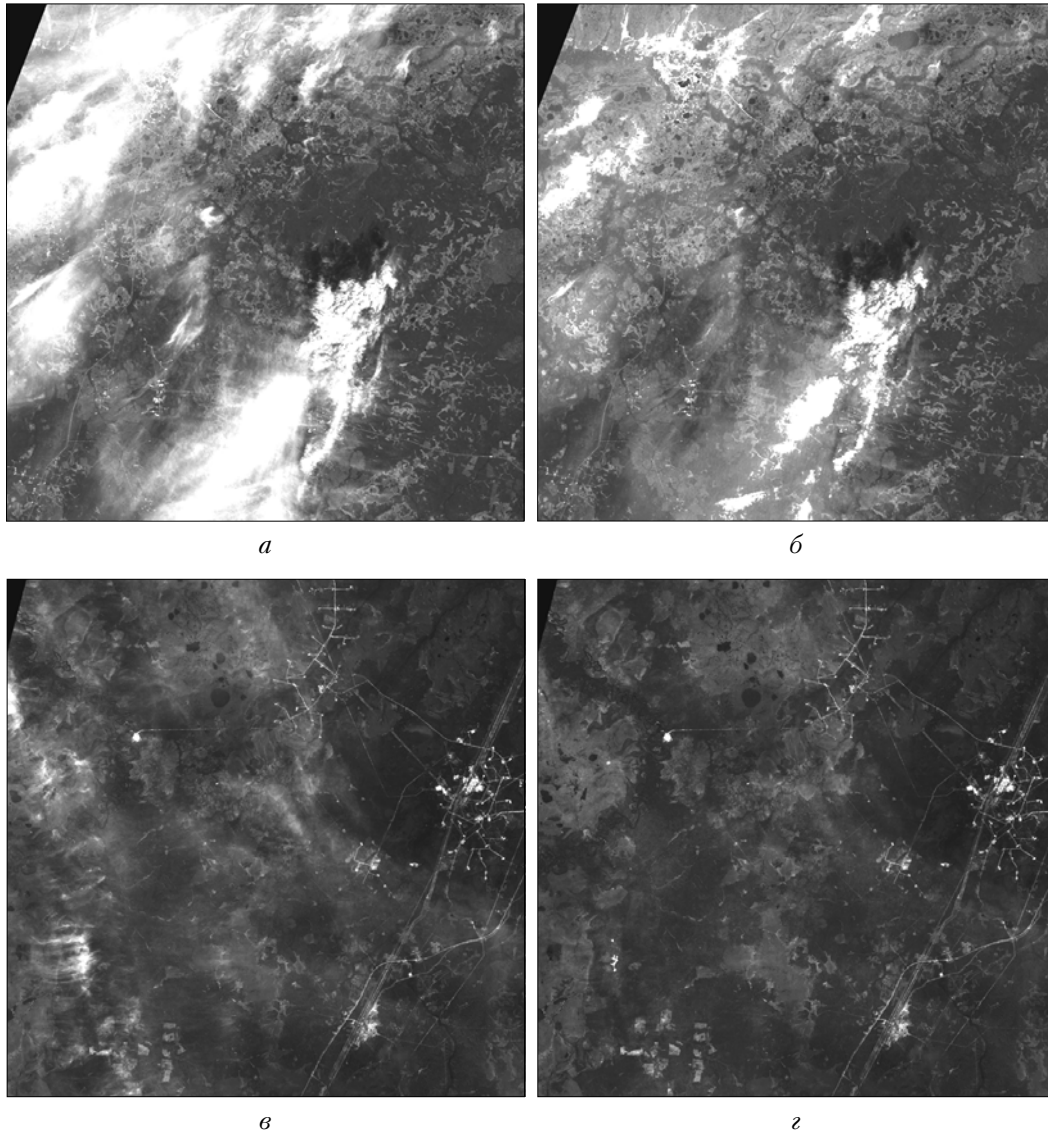


Рис. 5. Результаты удаления полупрозрачной облачности: *а* – исходный снимок; *б* – результаты работы алгоритма; *в* – исходный снимок; *г* – результаты работы алгоритма

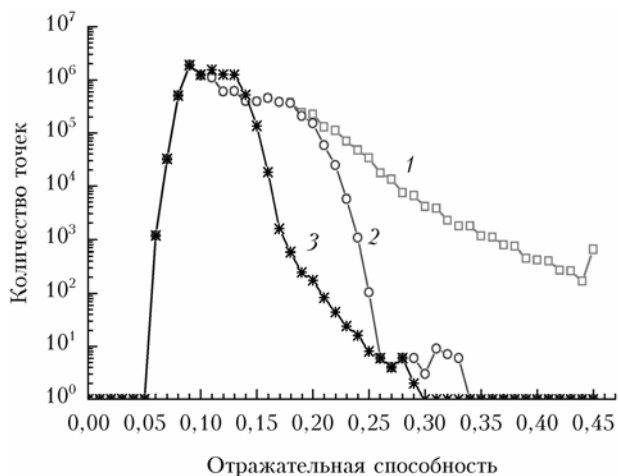


Рис. 6. Оценка результатов работы алгоритма: *1* – исходный снимок; *2* – удалена плотная облачность; *3* – удалена полупрозрачная облачность

при этом самые низкие значения в левой части остались незатронутыми. При этом средние значения  $\rho_d$  и СКО изменились с 0,131 и 0,042 до коррекции на 0,114 и 0,018 после.

После удаления облачности снимок становится пригодным для дальнейших этапов атмосферной коррекции – учета вклада аэрозоля и молекулярного ослабления и рассеяния.

Таким образом, в рамках задачи реализации универсального программного комплекса атмосферной коррекции успешно реализованы и апробированы на основе данных спутниковой системы ETM+//Landsat-7 алгоритмы получения облачной маски и удаления полупрозрачной облачности.

Работа выполнена при поддержке и в рамках Государственного контракта 14.515.11.0030 и интеграционного проекта СО РАН № 131а.

1. Лагутин А.А., Суторихин И.А., Синицин В.В., Жуков А.П., Шмаков И.А. Мониторинг крупных промыш-

- ленных центров юга Западной Сибири с использованием данных MODIS и наземных наблюдений // Оптика атмосф. и океана. 2011. Т. 24, № 1. С. 60–66.
2. *Воропай Н.Н., Истомина Е.А., Василенко О.В.* Исследование температурного поля земной поверхности Тункинской котловины с использованием космических снимков Landsat // Оптика атмосф. и океана. 2011. Т. 24, № 1. С. 67–73.
  3. *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).
  4. *Rahman H., Dedieu G.* SMAC: a simplified method for the atmospheric correction of satellite measurements in the solar spectrum // Int. J. Remote Sens. 1994. V. 15, N 1. P. 123–143.
  5. *Richter R., Mueller A., Heiden U.* Aspects of operational atmospheric correction of hyperspectral imagery // Int. J. Remote Sens. 2002. V. 23, N 1. P. 145–157.
  6. *Schlaepfer D., Richter R.* Geo-atmospheric processing of airborne imaging spectrometry data. Part 1: parametric orthorectification // Int. J. Remote Sens. 2002. V. 23, N 13. P. 2609–2630.
  7. *Irish R.R., Barker J.L., Goward S.N., Arvidson T.* Characterization of the Landsat-7 ETM Automated Cloud-Cover Assessment (ACCA) // Algorithm. Photogrammetric Eng. & Remote Sens. 2006. V. 72, N 10. P. 1179–1188.
  8. *Richter R.* Atmospheric correction of satellite data with haze removal including a haze/clear transition region // Comp. and Geosci. 1996. V. 22, N 6. P. 675–681.
  9. *Crist E.P., Cicone R.C.* A physically-based transform of Thematic Mapper data – the Tasseled Cap // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 1984. V. GE-22, N 3. P. 256–263.
  10. *Zhang Y., Guindon B., Cihlar J.* An image transform to characterize and compensate for spatial variations in thin cloud contamination of Landsat images // Remote Sens. of Environ. 2002. V. 82, N 2–3. P. 173–187.

*D.V. Solomatov, S.V. Afonin, V.V. Belov.* **Construction of cloud mask and removal of semitransparent clouds on ETM+/Landsat-7 satellite images.**

We analyzed the existing software for atmospheric correction of satellite data in the channels of the visible range, their advantages and disadvantages. The architecture of software complex, developed at Institute of Atmospheric Optics for atmospheric correction of satellite measurements, is presented. We consider the application of algorithms for the purpose of constructing the cloud mask and removing the semitransparent clouds by the example of satellite images of ETM+/Landsat-7 instrument.