

С.В. Афонин, Д.В. Соломатов

Методика учета оптико-метеорологического состояния атмосферы для решения задач атмосферной коррекции спутниковых ИК-измерений

Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск

Поступила в редакцию 3.08.2007 г.

Представлена методика атмосферной коррекции спутниковых ИК-измерений EOS/MODIS, в основе которой используются пакет программ IMAPP и программы моделирования переноса через атмосферу теплового излучения. Кратко описаны структура программного комплекса и работа его основных блоков. Рассмотрен пример применения методики для восстановления температуры подстилающей поверхности в условиях наличия полупрозрачной облачности и дыма.

Введение

Очевидным фактом является то, что эффективное решение задач оперативного контроля состояния окружающей среды из космоса тесно связано с применением высокоточных алгоритмов тематической обработки и атмосферной коррекции спутниковых измерений. Особое значение это обстоятельство приобретает для задач температурного зондирования подстилающей поверхности из космоса при сложных условиях наблюдений, включая задачу оперативного обнаружения слабоинтенсивных очагов пожаров на ранней стадии их развития [1, 2]. К сожалению, используемые на практике методы не обеспечивают надежного и универсального решения проблемы атмосферной коррекции ИК-измерений, особенно при сложных условиях наблюдений.

Анализ литературных источников позволяет выделить три основных типа алгоритмов, используемых для атмосферной коррекции спутниковых ИК-измерений температуры подстилающей поверхности (ТПП): а) спектральный метод измерений ТПП (Split-window LST algorithm, или SW-алгоритм); б) угловой метод измерений ТПП (Dual-angle LST algorithm, или DA-алгоритм); в) применение радиационных моделей (Radiative transfer approaches, или RT-метод).

а) Применение SW-алгоритма [3] основано на линейных соотношениях между ТПП и спутниковыми измерениями в двух спектральных каналах вблизи 11 и 12 мкм. Соотношения могут включать также значения излучательной способности $\epsilon(\lambda)$ подстилающей поверхности для этих каналов. Параметры этих соотношений вычисляются на основе данных моделирования или данных совместного анализа спутниковых и наземных измерений ТПП. Примером такого подхода является штатный алгоритм дистанционных измерений ТПП по данным MODIS [4]:

$$T_0 = C + \alpha(T_{11} + T_{12})/2 + \beta(T_{11} - T_{12})/2;$$

$$\alpha = A_1 + A_2(1 - \epsilon)/\epsilon + A_3(\Delta\epsilon/\epsilon^2);$$

$$\beta = B_1 + B_2(1 - \epsilon)/\epsilon + B_3(\Delta\epsilon/\epsilon^2);$$

$$\epsilon = (\epsilon_{11} + \epsilon_{12})/2, \Delta\epsilon = (\epsilon_{11} - \epsilon_{12})/2,$$

где коэффициенты A_i и B_i ($i = 1, 3$) зависят от зенитного угла спутника и интегрального влагосодержания атмосферы.

С практической точки зрения этот подход является эффективным средством глобального мониторинга ТПП с ограниченным объемом входных данных. Однако при этом следует отметить, что алгоритмы такого типа дают хорошие результаты только для ограниченного диапазона «стандартных» ситуаций в безоблачной атмосфере с умеренным содержанием в тропосфере водяного пара и фонового аэрозоля. В этой связи следует отметить доклад руководителя MODIS LST Group доктора Zhengming Wan (Institute for Computational Earth System Science, UCSB, USA) «MODIS LST and Emissivity Algorithms and Products» на заседании MODIS Collection 5 Workshop в январе 2007 г. В презентации доклада среди основных направлений дальнейшего развития алгоритмов восстановления ТПП было выделено решение задачи оперативного учета влияния аэрозоля и полупрозрачной облачности.

б) В угловом методе также используются линейные соотношения между ТПП и спутниковыми измерениями в канале вблизи 11 мкм и при двух углах визирования оси прибора. Этот метод может быть использован для приборов типа ATSR [5, 6]. Он имеет свои преимущества, но в целом его применение носит ограниченный характер.

в) В рамках RT-метода осуществляется учет искажающих характеристик атмосферы с помощью специальных компьютерных программ типа LOWTRAN7, MODTRAN, ATCOR и т.п. на основе

априорной оптико-метеорологической информации о состоянии атмосферы в момент спутниковых наблюдений. Затем на основе уравнения переноса теплового излучения через атмосферу осуществляется восстановление искомым значений ТПП. Примеры использования такого подхода – атмосферная коррекция данных радиометров МСУ-СК, NOAA/AVHRR, Landsat, ASTER [7–13].

С точки зрения универсальности и явного учета всех искажающих факторов при решении задачи восстановления ТПП и с теоретической точки зрения этот подход можно считать наиболее последовательным и корректным, хотя его практическое применение сталкивается с необходимостью получения большого объема оперативной априорной информации требуемого качества. Кроме того, достаточно высокие требования выдвигаются к точности оптических моделей атмосферы и скорости вычислений. Однако с помощью комбинированного подхода – быстрого SW-алгоритма для «стандартных» ситуаций и RT-метода для ситуаций, выходящих за рамки стандартных (при наличии аэрозоля, полупрозрачной или перистой облачности), можно расширить возможности методов зондирования ТПП из космоса.

В Институте оптики атмосферы (ИОА) СО РАН исторически особое внимание уделяется именно реализации RT-метода [7–9]. Так, в 2005 г. была разработана первая версия программного обеспечения атмосферной коррекции аэрокосмических измерений ТПП [14], в том числе и с помощью широко применяемых спутниковых систем EOS/MODIS и NOAA/AVHRR. При использовании RT-метода для восстановления ТПП по спутниковым измерениям ключевым условием является наличие оперативной априорной информации о метеорологических и оптических параметрах атмосферы в момент проведения спутниковых наблюдений. Поэтому в целях дальнейшего развития этого программного комплекса включение блока подготовки априорной информации для решения задачи атмосферной коррекции является необходимым. В настоящей статье представлена реализация такого блока для спутниковой системы EOS/MODIS. В последующих работах будет представлено аналогичное программное обеспечение для спутниковой системы NOAA/AVHRR, где восстановление метеопараметров атмосферы осуществляется по измерениям NOAA/ATOVS.

Структура программного комплекса

Прежде всего, необходимо отметить тот факт, что к настоящему моменту известны два типа базовых программных средств тематической обработки данных спутниковой системы EOS/MODIS.

К первому типу относятся лицензионные разработки DRL (Direct Readout Lab, GSFC/NASA), где базовые алгоритмы сгруппированы в PGE (Product Generation Executive), каждый из которых содержит тексты программ и необходимые данные для их сборки, установки и эксплуатации.

В России эти программные средства уже несколько лет успешно используются в Центре космического мониторинга Алтайского госуниверситета [15].

Второй тип разработок – это известный пакет программ IMAPP (International MODIS/AIRS Processing Package). Разработка, сопровождение и распространение пакета осуществляются под лицензией GNU General Public License в центре Space Science and Engineering Center (SSEC), который является подразделением University of Wisconsin–Madison (<ftp://ftp.ssec.wisc.edu/pub/IMAPP/MODIS/>).

Для решения поставленной в данной работе задачи нами в качестве основы был выбран пакет IMAPP v 2.0 и произведена его адаптация к работе в операционной среде Windows. Общая схема (рис. 1) разработанного в ИОА СО РАН программного обеспечения для тематической обработки данных EOS/MODIS включает три основных этапа.

Этап 1. На первоначальном этапе (уровни 0 и 1) с помощью программы IMAPP осуществляется распаковка спутникового файла EOS/MODIS из формата PDS в совокупность файлов формата HDF-EOS, проводятся географическая привязка данных и калибровка спутниковых измерений.

Этап 2. На втором этапе (уровень 2) осуществляется работа блока программных средств, с помощью которых по измерениям прибора MODIS осуществляется подготовка априорной информации о параметрах состояния атмосферы, включающей:

- облачную маску (MOD35);
- оптические характеристики аэрозоля (MOD04);
- интегральное влагосодержание атмосферы (MOD05);
- характеристики облачности (MOD06);
- вертикальные профили геопотенциала, температуры и влажности воздуха, содержания озона (MOD07).

Этап 3. На основе потока априорной информации, сформированного на этапе 2, с использованием программного блока «Атмосферная коррекция» (подробное описание приведено в [14]) производится расчет характеристик искажающего влияния атмосферы и осуществляется атмосферная коррекция спутниковых измерений температуры подстилающей поверхности и ее спектральной отражательной способности. В настоящий момент основу этого блока составляют хорошо зарекомендовавшие себя расчетные программы MODTRAN, 6S. Применение программы 6S позволит расширить возможности базовых алгоритмов восстановления аэрозольных и облачных характеристик путем их адаптации на основе программ GetHaze/GetCloud к региональным условиям мониторинга.

Для задания значений излучательных способностей $\epsilon(\lambda)$ в ИК-каналах $\lambda = 3,96, 11$ и 12 мкм прибора EOS/MODIS используются данные MODIS UCSB Emissivity Library (<http://www.icesc.ucsb.edu/modis/EMIS/html/em.html>) или база данных Global Infrared Land Surface Emissivity Database (<http://cimss.ssec.wisc.edu/iremisis/>).

На рис. 2 представлен интерфейс блока программ, который осуществляет выполнение ключевого этапа 2.

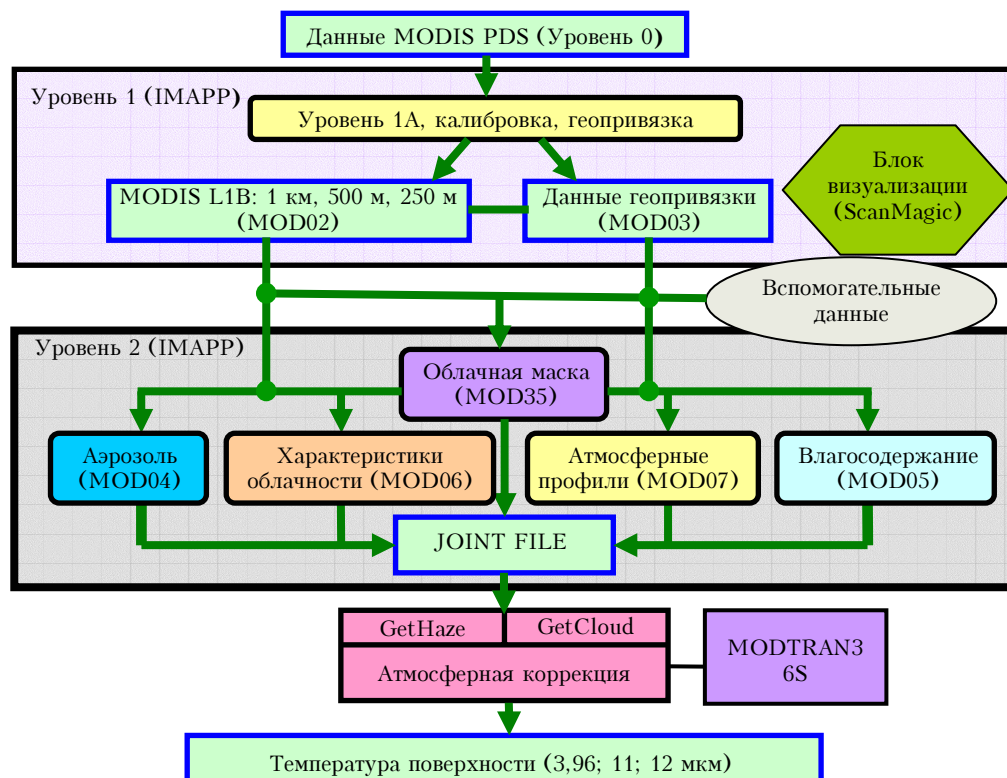


Рис. 1. Блок-схема атмосферной коррекции дистанционных измерений характеристик подстилающей поверхности с помощью спутниковой системы EOS/MODIS

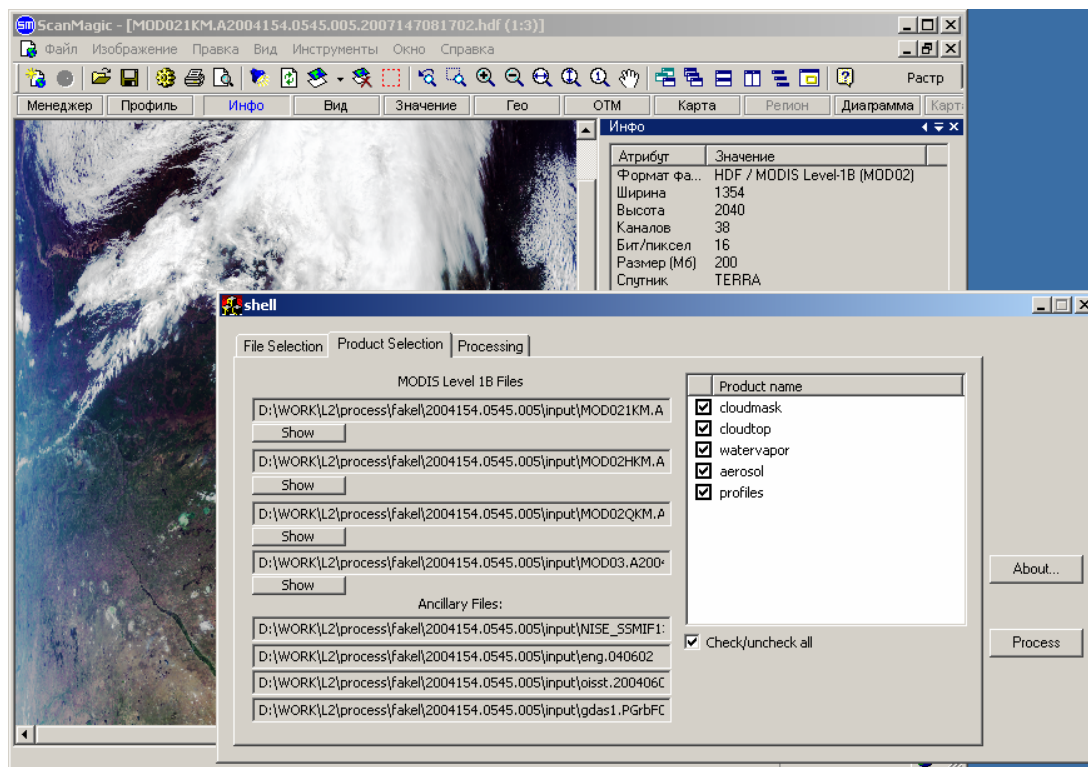
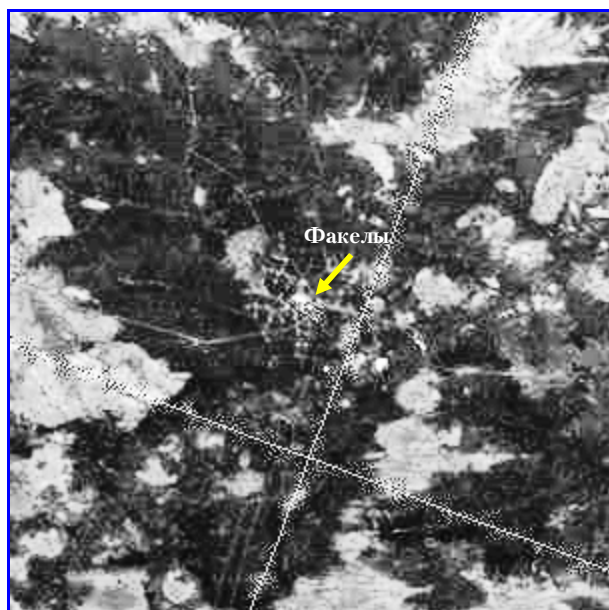


Рис. 2. Интерфейс программы определения параметров атмосферы по измерениям EOS/MODIS

Пример применения методики

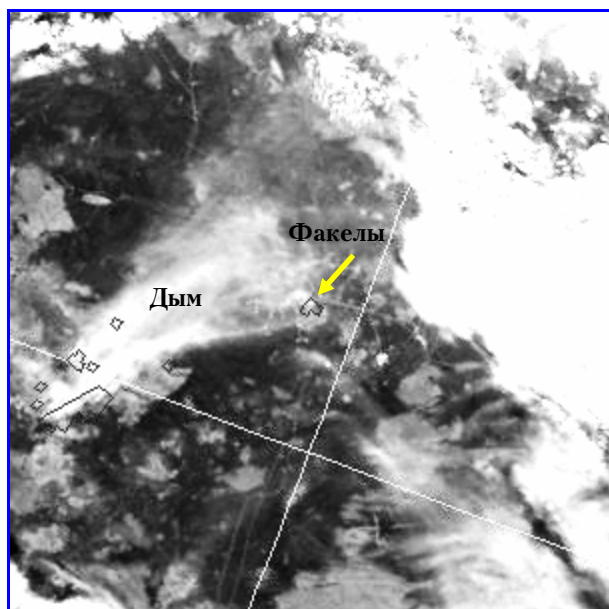
Для предварительной проверки работы программного комплекса был рассмотрен случай температурного зондирования участка Лугинецкого месторождения (58,15° с.ш., 78,89° в.д.) при различных атмосферных условиях. На рис. 3 приведены спутниковые изображения этой территории размером 60×60 км (пространственное разрешение 250 м),

2 июня 2004 г.; время 12:38



А. Безоблачная атмосфера

5 июня 2004 г.; время 13:15



Б. Дым, облачность

Рис. 3. Спутниковые изображения MODIS территории Лугинецкого НГКМ; географическая проекция – Albers Conical Equal Area

полученные в результате композиции трех спектральных каналов видимого диапазона спутниковой системы EOS/MODIS за 2 и 5 июня 2004 г. В центре изображений находятся факельные установки Лугинецкого НГКМ.

На снимке «А», где отсутствует облачность, а аэрозоль имеет фоновое содержание, отчетливо выделяются два основных типа поверхности – участки покрытой растительностью почвы (темные) и открытые участки почвы (светлые). Анализ ряда безоблачных снимков позволяет сделать вывод о том, что пространственное распределение температуры подстилающей поверхности повторяет контуры снимка и является достаточно стабильным, а температура светлых участков на 2–3° выше температуры темных участков поверхности. На снимке «Б» уже совсем иная ситуация: дым от лесного пожара, плотная и полупрозрачная облачность заметно искажают пространственные контуры подстилающей поверхности.

Спутниковые изображения на рис. 3 дополняют данные рис. 4, построенные на основе снимков MODIS в декартовой системе координат.

Для ситуации «А» контурами обведены открытые участки почвы и отмечены характерные значения измерений альbedo в канале $\lambda = 466$ нм (ρ_{466}) и яркостной температуры в канале $\lambda = 11$ мкм (T_{11}). В центре хорошо выделяются яркие (в канале $\lambda = 466$ нм) факельные установки и песчаный карьер (правее). Разности яркостных температур в каналах $\lambda = 11$ и 12 мкм характеризуют масштаб пространственной неоднородности искажающих свойств атмосферы в ИК-диапазоне спектра.

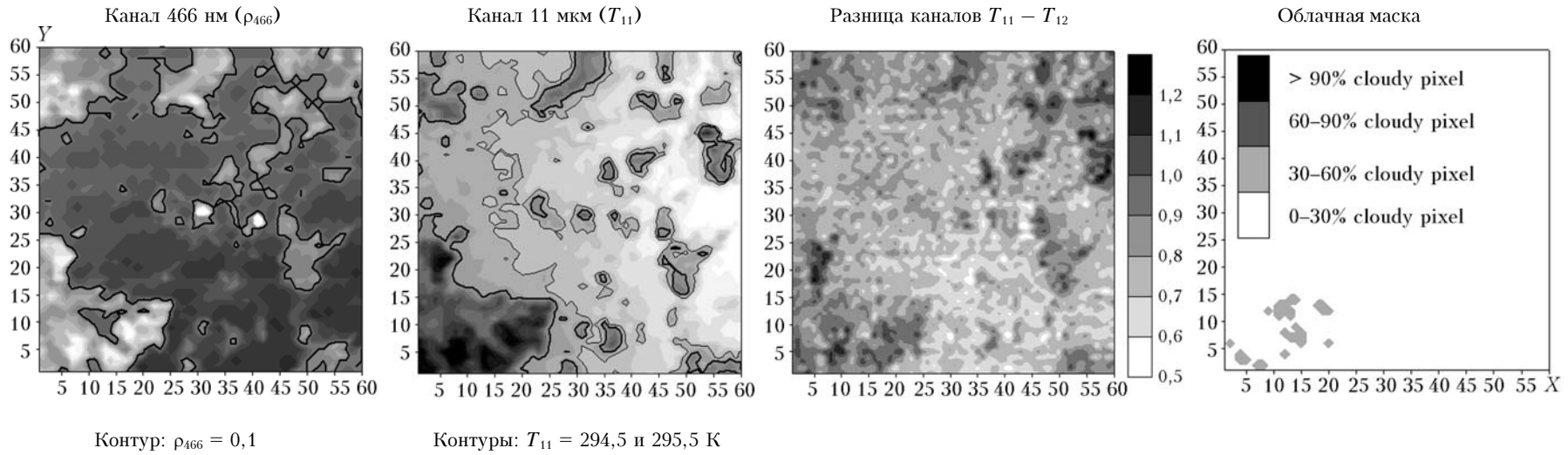
Анализ величины $T_{11} - T_{12}$ для ситуации «А» позволяет сделать вывод о том, что искажающие свойства атмосферы в этом случае можно в целом считать квазиоднородными (1 диапазон значений 0,5–1,3°, СКО = 0,11°). И наоборот, для ситуации «Б» значения величины $T_{11} - T_{12}$ составляют диапазон 0,4–7,1° и СКО = 0,71°, главной причиной этого является наличие дыма и облачности.

Возникает закономерный интерес к результатам работы базового SW-алгоритма [4] (стандартный продукт имеет название MOD11_L2) в обеих рассматриваемых ситуациях. На рис. 5 представлены эти данные, полученные с сайта Land Processes Distributed Active Archive Center (LP DAAC, <http://edcdaac.usgs.gov/datapool/datapool.asp>).

В случае безоблачной атмосферы стандартный алгоритм MOD11 восстанавливает температуру подстилающей поверхности везде, за исключением лишь нескольких пикселей, поскольку облачная маска из-за ярких пикселей (на наш взгляд, ошибочно) фиксирует наличие частичной облачности. Пространственная структура ТПП в этом случае почти идентична пространственной структуре яркостных температур.

Для ситуации «Б» пространственные структуры ρ_{466} , T_{11} и ТПП существенно искажены дымом и облачностью, и при этом значительно возросло количество пикселей белого цвета, где данные MOD11 отсутствуют.

А. Безоблачная атмосфера



Б. Дым, облачность

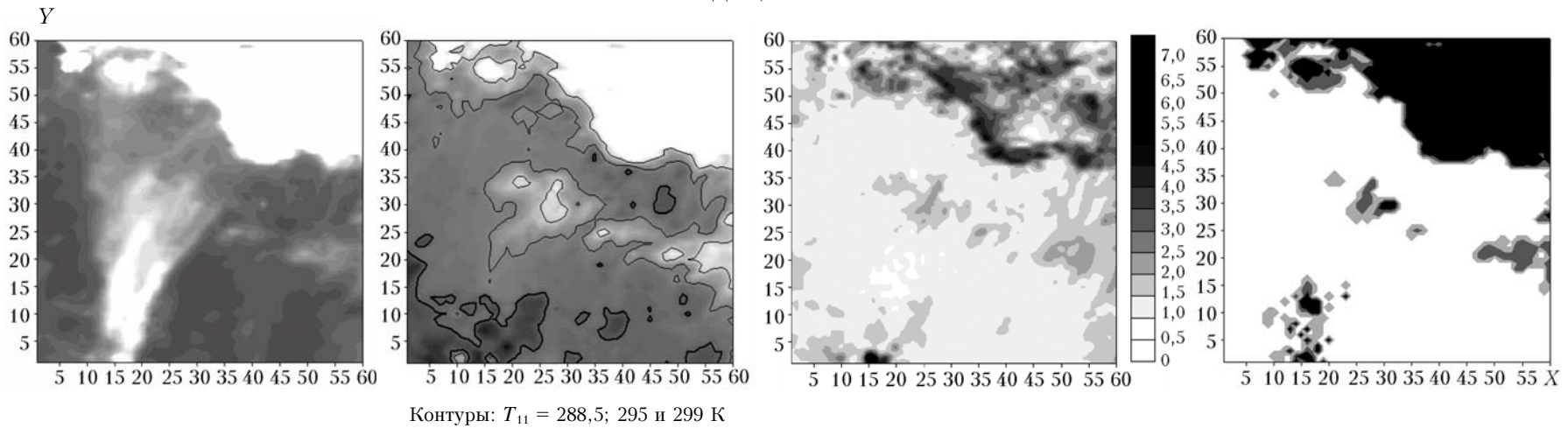


Рис. 4. Спутниковые данные MODIS: значения альbedo в канале $\lambda = 466$ нм, яркостные температуры в канале $\lambda = 11$ мкм, разница яркостных температур в каналах $\lambda = 11$ и 12 мкм, облачная маска

Температура поверхности (LST, MOD11)

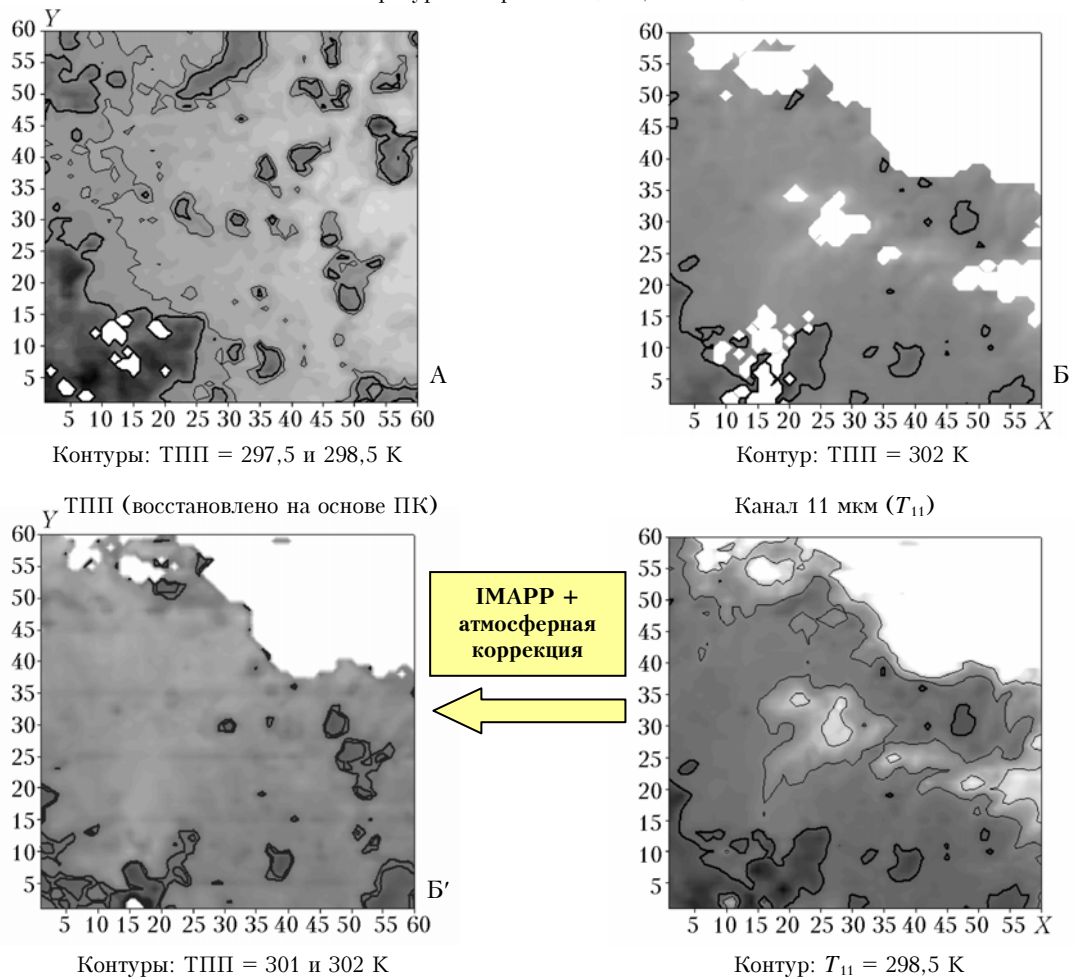


Рис. 5. Результаты восстановления ТПП с помощью стандартного алгоритма MOD11 (2 верхних рисунка) и на основе разработанного программного комплекса

Сохранившиеся на изображении структуры T_{11} отмечены контуром. Следует отметить, что результаты восстановления ТПП в этом случае, кроме пропусков, содержат и явно заниженные значения ТПП, лежащие в пределах контуров облачности.

Теперь наша задача состоит в том, чтобы «заполнить» белые пропуски в данных о ТПП и после атмосферной коррекции на участках, где тепловое излучение поверхности в достаточной степени проходит через дым и аэрозоль, восстановить ТПП и воспроизвести температурную структуру, аналогичную случаю безоблачной атмосферы.

Для целей атмосферной коррекции был использован разработанный программный комплекс. В качестве априорной информации привлекались данные, восстановленные с помощью IMAPP по измерениям MODIS. На основе программы MODTRAN по методике [14] был произведен расчет искажающих характеристик атмосферы для канала $\lambda = 11$ мкм (нижняя часть рис. 5), осуществлена коррекция измерений яркостных температур T_{11} и получено новое «Б'» пространственное распределение ТПП.

После коррекции часть температурной структуры участка поверхности с центром в точке

($Y = 25$, $X = 52$) была восстановлена. Следует обратить внимание на тот важный факт, что различие восстановленных в окрестности этой точки значений ТПП находится для «Б» и «Б'» в пределах 1° . Кроме того, восстановлена температура поверхности в окрестности факельных установок ($Y = X = 30$).

Рассмотрим еще один результат применения программного комплекса — восстановление температуры теплового излучения факельных установок T_F по измерениям яркостных температур T_4 в канале $\lambda = 3,96$ мкм с учетом (на основе данных IMAPP) оптико-метеорологического состояния атмосферы по методике [2]:

$$B(T_\lambda) = I_{hot} + I_{bg},$$

$$B_{hot} = S(\theta)\varepsilon_\lambda^F B(T_F)P_\lambda; I_{bg} = I_{srf} + I_{atm} + I_{rfl} + I_{sct},$$

$$B_{hot} = (B(T_\lambda) - I_{bg})/P_\lambda,$$

где $B(T_\lambda)$ — функция Планка, T_λ — яркостная температура теплового излучения; I_{hot} — интенсивность ослабленного атмосферой излучения факела; I_{bg} — интенсивность излучения фона; I_{srf} — вклад ослабленного атмосферой теплового излучения поверхности, I_{atm} — вклад теплового излучения атмосферы;

I_{ref} — вклад отраженных от поверхности падающих на нее потоков теплового и солнечного излучений; I_{scat} — вклад рассеянных атмосферой потоков теплового и солнечного излучений; $P_\lambda = \exp\{-\tau_\lambda\}$ — функция пропускания атмосферы; τ_λ — оптическая толщина атмосферы; $S(\theta)$ — относительная площадь факела по отношению к размеру пиксела.

Таблица иллюстрирует результаты решения этой задачи при условии, что диаметр пламени равен 8 м.

| Ситуация | ТПП, К | P_λ, τ_λ | $T_{11}, К$ | $T_4, К$ | $T_F, К$ |
|----------|--------|---------------------------|-------------|----------|----------|
| А | 300,0 | 0,822 (0,196) | 297,4 | 334,0 | 2430 |
| Б | 302,0* | 0,344 (1,067) | 293,8 | 321,0 | 2450 |

* ТПП = $T_{11,cor}$ — температура восстановлена после атмосферной коррекции измерений в канале $\lambda = 11$ мкм с помощью разработанного программного комплекса (см. рис. 5, ситуация Б').

Таким образом, результаты восстановления температуры пламени факела очень близки, несмотря на значительные различия атмосферных условий спутниковых наблюдений. При этом следует отметить, что без проведения атмосферной коррекции результаты восстановления температуры горения факела для ситуаций А и Б существенно различаются и составляют соответственно 2180 и 1410 К. Атмосферные искажения измерений из космоса температуры горения факела в этом случае для ситуации Б превысили 1000 К.

Заключение

Представленный в данной статье прототип программных средств оперативной атмосферной коррекции спутниковых ИК-измерений MODIS позволяет расширить возможности существующих методов температурного зондирования подстилающей поверхности за счет учета искажающего влияния аэрозоля и полупрозрачной облачности.

Авторы выражают благодарность д.ф.м.н. В.В. Белову за интерес к работе и ее поддержку и И.В. Энгель за информацию о Лугинецком НГКМ и его факельных установках.

1. *Афонин С.В., Белов В.В.* Информационно-методические основы построения эффективных систем спутникового мониторинга лесных пожаров // Вычисл. техн. 2003. Т. 8. Спец. выпуск. С. 35–46.
2. *Афонин С.В.* К вопросу об атмосферной коррекции спутниковых данных в задаче мониторинга из космоса малоразмерных очагов лесных пожаров // Оптика атмосф. и океана. 2005. Т. 18. № 4. С. 331–334.
3. *Coll C., Caselles V.* A split-window algorithm for land surface temperature from advanced very high resolution

radiometer data: Validation and algorithm comparison // J. Geophys. Res. D. 1997. V. 102. N 14. P. 16,697–16,713.

4. *Wan Z.* MODIS Land-Surface Temperature Algorithm Theoretical Background Document (LST ATBD). 1999. Version 3.3 [Электронный ресурс]: http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod11.pdf
5. *Sobrino J.A., Li Z.L., Stoll M.P., Becker F.* Multi-channel and multi-angle algorithms for estimating sea and land surface temperature with ATSR data // Int. J. Remote. Sens. 1996. V. 17. N 11. P. 2089–2114.
6. *Prata F.* Land Surface Temperature Measurement from Space: AATSR Algorithm Theoretical Basis Document. 2002. [Электронный ресурс]: http://earth.esa.int/pub/ESA_DOC/LST-ATBD.pdf
7. *Афонин С.В.* Разработка и применение атмосферной радиационной модели для определения температуры поверхности океана по данным спутникового зондирования: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. Томск, 1987. 192 с.
8. *Зуев В.Е., Селиванов А.С., Фомин В.В., Панфилов А.С., Романов А.В., Афонин С.В., Хамарин В.И.* Измерение температуры поверхности океана аппаратурой МСУ-СК со спутника «Космос-1689» // Оптика атмосф. 1988. Т. 1. № 11. С. 76–80.
9. *Афонин С.В., Панфилов А.С., Романов А.В., Селиванов А.С., Фомин В.В., Хамарин В.И.* Подспутниковые эксперименты по контролю радиометрической точности ИК-каналов приборов МСУ-СК ИСЗ «Ресурс-01» № 2 в период ЛКИ // НПО «Планета». 1993. Вып. 42. С. 33–37.
10. *Успенский А.Б., Щербина Г.И.* Оценка температуры и излучательной способности поверхности суши по данным измерений уходящего теплового излучения с ИСЗ NOAA // Исслед. Земли из космоса. 1996. № 5. С. 102–112.
11. *Thome K., Palluconi F., Takashima T., Masuda K.* Atmospheric correction of ASTER // IEEE Trans. Geosci. and Remote Sens. 1998. V. 36. N 4. P. 1199–1211.
12. *Palluconi F., Hoover G., Alley R., Jentoft-Nilsen M., Thompson T.* Atmospheric correction method for ASTER thermal radiometry over land (AST-09T) // Algorithm Theoretical Background Document. Version 3.0. 1999. [Электронный ресурс]: http://eosps.gsfc.nasa.gov/eos_homepage/for_scientists/atbd/viewInstrument.php?instrument=24
13. *Sobrino J.A., Jiménez-Muñoz J.C., Paolini L.* Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5 // Remote Sens. of Environ. 2004. V. 90. P. 434–440.
14. *Афонин С.В., Белов В.В., Соломатов Д.В.* Разработка программного обеспечения для атмосферной коррекции аэрокосмических ИК-измерений температуры подстилающей поверхности // Оптика атмосф. и океана. 2006. Т. 19. № 1. С. 69–76.
15. *Лагутин А.А., Никулин Ю.А., Жуков А.П., Лагутин А.А., Резников А.Н., Синицын В.В., Шмаков И.А.* Математические технологии оперативного регионального спутникового мониторинга характеристик атмосферы и подстилающей поверхности. Ч. 1. MODIS // Вычисл. техн. 2007. Т. 12. № 2. С. 67–89.

S.V. Afonin, D.V. Solomatov. The technology of fast accounting for optical-meteorological atmospheric state for solving the problems of atmospheric correction of EOS/MODIS space IR measurements.

The technology of fast atmospheric correction of the EOS/MODIS space IR measurements is presented, which is based on the use of the IMAPP program package and programs for modeling thermal radiation transfer. The structure and the performance of main blocks of the software are concisely described. The applicability of the program complex for retrieval of the underlying surface temperature under conditions of semi-transparent cloudiness and fog is demonstrated.

Методика учета оптико-метеорологического состояния атмосферы для решения задач...