

Физические основы и результаты применения RTM-метода в задачах ИК-зондирования земной поверхности из космоса

С.В. Афонин^{1,2}, В.В. Белов^{1,2}, Д.В. Соломатов¹

¹Институт оптики атмосферы им. В.Е.Зуева СО РАН

²Томский государственный университет

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

Рассмотрены физические аспекты применения RTM-метода для решения задач температурного мониторинга подстилающей поверхности из космоса, получены количественные оценки эффективности применения RTM-метода.

Ключевые слова: температура земной поверхности, мониторинг из космоса, обнаружение пожаров, атмосферная коррекция.

Введение

Известно, что дистанционное зондирование температуры подстилающей поверхности (ТПП) из космоса позволяет получать важную информацию о многих физических, химических и биологических процессах на Земле. Среди этих задач особое место занимает актуальная проблема оперативного обнаружения чрезвычайных ситуаций – пожары, вулканы, землетрясения и т.д.

В течение последних 25 лет активно развивались спутниковые методы восстановления ТПП [1-6], имеющие общее название “*split-window methods*” (SW-метод). В основе этого подхода используются ИК-измерения в двух спектральных каналах “расщепленного” окна прозрачности атмосферы 10–13 мкм и реализуется методика дифференциального поглощения для учета искажающего влияния водяного пара.

Общая форма этих алгоритмов основана на линейных соотношениях между ТПП (T_S) и спутниковыми измерениями (радиационными температурами) в двух спектральных каналах вблизи 11 и 12 мкм (T_{11} и T_{12}):

$$T_S = C + \alpha \cdot T_{11} + \beta \cdot (T_{11} - T_{12}) \quad (1)$$

где коэффициенты C , α , β определяются на основе данных совместной статистической обработки наземных и спутниковых измерений или результатов имитационного моделирования спутниковых измерений ТПП для широкого диапазона метеорологических моделей атмосферы.

Существует иная форма соотношения (1), которая включает значения излучательной способности ε_{11} и ε_{12} подстилающей поверхности для этих каналов, их разницу $\Delta\varepsilon$, зависимость коэффициентов от влагосодержания, температуры приземного воздуха и зенитного угла наблюдения.

С практической точки зрения эти алгоритмы весьма просты и эффективны для глобального мониторинга ТПП. Однако при этом следует принимать во внимание ряд существенных ограничений к их использованию:

1. Погрешность восстановления ТПП $\delta T_S \approx 6.19 \cdot \delta T_\lambda$ существенно зависит от ошибок измерений δT_λ , что составляет около 0.3-0.7 К.

2. Требуется хорошее знание излучательной способности поверхности ε_{11} и ε_{12} , а также их разности $\Delta\varepsilon$. По данным работ [2, 3] для $\delta T_S \approx 0.5$ К относительная погрешность задания ε должна быть не более $\delta\varepsilon \approx 0.5-1\%$, а в случае $\Delta\varepsilon$ не хуже $\delta\varepsilon \approx 0.25-0.5\%$.

3. Коэффициенты алгоритмов определены только для заданного диапазона «стандартных» ситуаций в безоблачной атмосфере.

4. В рамках алгоритма производится учет поглощения теплового излучения водяным паром, но отсутствует учет искажений, вызванных аэрозолем и перистой облачностью.

Таким образом, используемые на практике методы восстановления ТПП (1) не обеспечивают надежного и универсального решения проблемы атмосферной коррекции ИК-измерений, особенно при сложных (“нестандартных”) условиях наблюдений.

Более корректный подход к решению этой задачи заключается в использовании моделей переноса теплового излучения (*Radiative Transfer Model*). В рамках RTM-метода осуществляется учёт искажающих характеристик атмосферы с использованием широко известных компьютерных программ LOWTRAN7, MODTRAN, ATCOR и т.п. на основе априорной оптико-метеорологической информации о состоянии атмосферы в момент спутниковых наблюдений. Примеры такого подхода можно найти в работах [7-10].

Интенсивное развитие вычислительной техники и современных технологий параллельного программирования [11, 12] позволяет снять вопрос о трудоемкости проведения большого объема вычислений. Кроме того, в работе [10] предлагается использовать комбинированный подход – быстрый SW-метод для «стандартных» ситуаций и RTM-метод для ситуаций, выходящих за их рамки (при наличии оптически плотного аэрозоля, полупрозрачной или перистой облачности).

В этой работе проведен анализ различных аспектов применения RTM-метода с использованием ИК-каналов (20, 21/22, 31, 32) прибора EOS/MODIS для температурного мониторинга земной поверхности.

Вклад атмосферы в спутниковые инфракрасные измерения

Известно, что в число основных факторов влияния молекулярной компоненты атмосферы на тепловое излучение в каналах EOS/MODIS входят: селективное поглощение спектральными линиями атмосферных газов и континуальное поглощение крыльями линий H_2O и N_2 . Несмотря на имеющиеся в литературе оценки влияния этих факторов на характеристики восходящих потоков теплового излучения, постоянное развитие моделей переноса теплового излучения делает необходимым уточнение этих оценок и их конкретизацию для задачи восстановления температуры земной поверхности.

Для этих целей нами был использован известный программный комплекс LBLRTM_v11.3 (11/2007) [13], в основе которого – база данных параметров спектральных линий HITRAN-2004 [14] (включая все изменения до 01/01/2007) и модели молекулярного континуума MT_CKD_2.1 [15].

Селективное поглощение спектральными линиями атмосферных газов

Анализ данных HITRAN-2004 о суммарной интенсивности спектральных линий молекул и интегральном содержании газов W_{GAS} позволяет из общего списка 39 молекул выделить оптически активные молекулы (в рассматриваемых спектральных каналах EOS/MODIS), которые определяют требуемую точность восстановления ТПП с использованием RTM-метода. К их числу относятся молекулы H_2O , CO_2 , O_3 , N_2O , CH_4 .

Для количественной оценки влияния селективного поглощения каждой из молекул (и их суммы) на точность RTM-метода можно вычислить изменение радиационной (яркостной) температуры, измеряемой в спутниковых каналах, когда выбранная молекула не будет учтена при проведении LBL-расчетов (“*line-by-line*”). Таким образом, необходимо вычислить разницу:

$$\delta T_{\lambda}(mol) = T_{\lambda}(\Sigma) - T_{\lambda}(\Sigma-mol), \quad (2)$$

где $T_{\lambda}(\Sigma)$ и $T_{\lambda}(\Sigma-mol)$ – расчетные значения радиационных температур, для которых соответственно учтены все поглощающие компоненты (Σ), либо не учтена выбранная молекула ($\Sigma-mol$).

Анализ результатов оценок δT_{λ} , позволяет сформулировать следующие выводы.

1. Влияние селективного поглощения атмосферными газами на $\delta T_{\lambda}(mol)$ во всех каналах EOS/MODIS превосходит уровень 0.25 К.
2. В каналах 20 и 21 влияние селективного поглощения на $\delta T_{\lambda}(mol)$ определяется линиями молекул H_2O , N_2O и CH_4 .
3. В каналах 31 и 32 достаточно учитывать только вклад линий H_2O .

Непосредственное использование LBL-методов в рамках RTM-метода практически невозможно в силу их трудоемкости, поэтому целесообразно применять проверенные практикой и доступные широкому пользователю упрощенные методы решения уравнения переноса излучения, которые, например, использованы в широко известной программе MODTRAN. В настоящее время программа MODTRAN_v4.x [17] является коммерческим продуктом, но её предыдущая версия MODTRAN_v3.x [16] и её коды доступны пользователю. Нами проведены расчеты $\delta T_{\lambda}(mol)$ с использованием программы MODTRAN_v3.5, в основе которой – база параметров спектральных линий HITRAN-96 [18] и модели молекулярного континуума CKD_v2.1_rev.3.3 [19]. Результаты сравнения значений $\delta T_{\lambda}(mol)$, полученных с помощью MODTRAN_v3.5 и LBLRTM_v11.3, говорят о том, что различия в этих данных составляют менее 0.15 К, а это вполне удовлетворяет практическим требованиям к точности восстановления ТПП из космоса.

Континуальное поглощение крыльями спектральных линий атмосферных газов

Согласно модели MT_CKD_v2.1, наряду с селективным поглощением теплового излучения линиями, расположенными внутри спектральных каналов, заметное влияние на измеряемые величины оказывает континуальное поглощение крыльями линий интенсивных полос H_2O , CO_2 , O_3 , N_2 , лежащих вне этих спектральных каналов.

Для количественной оценки влияния на δT_{λ} каждого компонента континуума, по аналогии с расчетами $\delta T_{\lambda}(mol)$, производился расчет величины $\delta T_{\lambda}(cont)$:

$$\delta T_{\lambda}(cont) = T_{\lambda}(\Sigma) - T_{\lambda}(\Sigma-cont), \quad (3)$$

где $T_{\lambda}(\Sigma)$ и $T_{\lambda}(\Sigma-cont)$ – расчетные значения РТ, для которых соответственно учтены все поглощающие компоненты (Σ), либо не учтен выбранный компонент континуума ($\Sigma-cont$).

Анализ результатов расчетов $\delta T_{\lambda}(cont)$ приводит к следующим выводам.

1) Для каналов 20 и 21 влияние континуумов H_2O и CO_2 на величину T_{λ} составляют менее 0.05 К. Влияние континуума N_2 на $\delta T_{\lambda}(cont)$ в канале 20 имеет такой же порядок величины, но заметно возрастает в канале 21, превышая уровень 1 К.

2) Сравнивая значения $\delta T_{\lambda}(cont)$, полученные на основе программ LBLRTM_v11.3 и MODTRAN_v3.5, можно утверждать, что различия этих значений в каналах 20,31,32 составляют менее 0.1 К, но в канале 21 увеличиваются до 0.2 К за счет континуума N_2 .

Влияние ошибок задания профилей метеопараметров

К настоящему времени современные базы параметров спектральных линий, модели молекулярного континуума и модели переноса теплового излучения в целом обеспечивают высокую точность учета влияния атмосферы на ошибки восстановления температуры земной поверхности, если используется достоверная априорная информация о ключевых метеорологических параметрах атмосферы $X(z)$, где z - высота. Поскольку вертикальные профили $X(z)$ содержат ошибки измерений (восстановления) $\delta X(z)$, то очевидно следует оценить влияние этих ошибок на точность RTM-метода.

Оценки проводились следующим образом: 1) для выбранного профиля метеопараметров атмосферы (например, метеомодель лета средних широт) вычислялась радиационная температура $T_{\lambda}(0)$; 2) затем в заданный профиль вносились того или иного рода изменения $\delta X(z)$ и вычислялась величина $T_{\lambda}(\delta X)$ для "искаженного" профиля; 3) далее вычислялась разница $\delta T_{\lambda}(\delta X) = T_{\lambda}(0) - T_{\lambda}(\delta X)$, определяющая степень влияния ошибок задания метеопараметров на величину радиационной температуры.

Таблица 1. Изменение яркостной температуры за счет вариаций профилей метеопараметров: температуры (δT_{AIR}) и влажности (δW_{H_2O}) воздуха, содержания малых атмосферных газов (δW_{GAS}).
Данные LBLRTM_v11.3

Параметр	Спектральные каналы			
	#20	#21	#31	#32
	<i>Лето средних широт</i>			
$\delta T_{AIR}=+2$ К	+0.206	+0.150	+0.632	+0.786
$\delta W_{H_2O}=+20\%$	-0.153	-0.010	-0.659	-0.820
$\delta W_{GAS}=+40\%$	-0.168	-0.151	-0.068	-0.043
	<i>Тропики</i>			
$\delta T_{AIR}=+2$ К	+0.241	+0.147	+0.968	+1.170
$\delta W_{H_2O}=+20\%$	-0.218	-0.020	-1.199	-1.418
$\delta W_{GAS}=+40\%$	-0.186	-0.169	-0.075	-0.043

Анализ результатов расчетов $\delta T_\lambda(\delta X)$ для температуры и влагосодержания воздуха, содержания остальных атмосферных газов (см. табл.1) позволяет сформулировать следующие выводы.

1) В каналах 20 и 21 влияние вариации профилей всех метеопараметров на δT_λ по абсолютной величине составляет менее 0.25 К, что в принципе позволяет на практике оптимизировать объем вычислений искажающих характеристик атмосферы.

2) В каналах 31 и 32 величина δT_λ для заданного значения δW_{GAS} не превышает 0.1 К, поэтому задание априорной информации о содержании в атмосфере малых газовых составляющих в этих каналах не требует высокой точности. Ошибки задания профилей температуры и влажности воздуха являются значимыми ($\delta T_\lambda > 0.5$ К).

3) Следует отметить тот факт, что одинаковый знак у величин δT_{AIR} и δW_{H_2O} соответствует разным по знаку значениям δT_λ . То есть, при наличии положительной корреляции между δT_{AIR} и δW_{H_2O} данное обстоятельство может приводить к взаимной компенсации ошибок задания ключевых для атмосферной коррекции метеопараметров. Тогда появляется возможность проводить атмосферную коррекцию данных дистанционных ИК-измерений ТПП на основе метеорологической информации с относительно низкими характеристиками ее точности.

К двум последним выводам необходимо добавить ряд следующих моментов. Во-первых, анализ спутниковых методов восстановления профилей температуры и влажности позволяет с большой степенью уверенности предположить, что ошибки восстановления температуры и влажности имеют положительную корреляцию. Во-вторых, разница по величине $\delta T_\lambda(\delta X)$ в каналах 31 и 32 позволяет компенсировать влияние δX путем применения RTM-метода по принципу “split-window”. Т.е. значение ТПП определяется следующим образом:

$$T_S = T_{S,31} - \Delta T_S, \Delta T_S = C_{ERR} \cdot (T_{S,32} - T_{S,31}), \quad (4)$$

где $T_{S,31}$ и $T_{S,32}$ – значения ТПП, восстановленные в каналах 31 и 32, $C_{ERR} \approx 2.0$ – коэффициент, полученный на основе результатов имитационных расчетов. В этом случае будет обеспечиваться устойчивость RTM-метода к ошибкам задания априорной метеоинформации.

Восстановление температуры земной поверхности

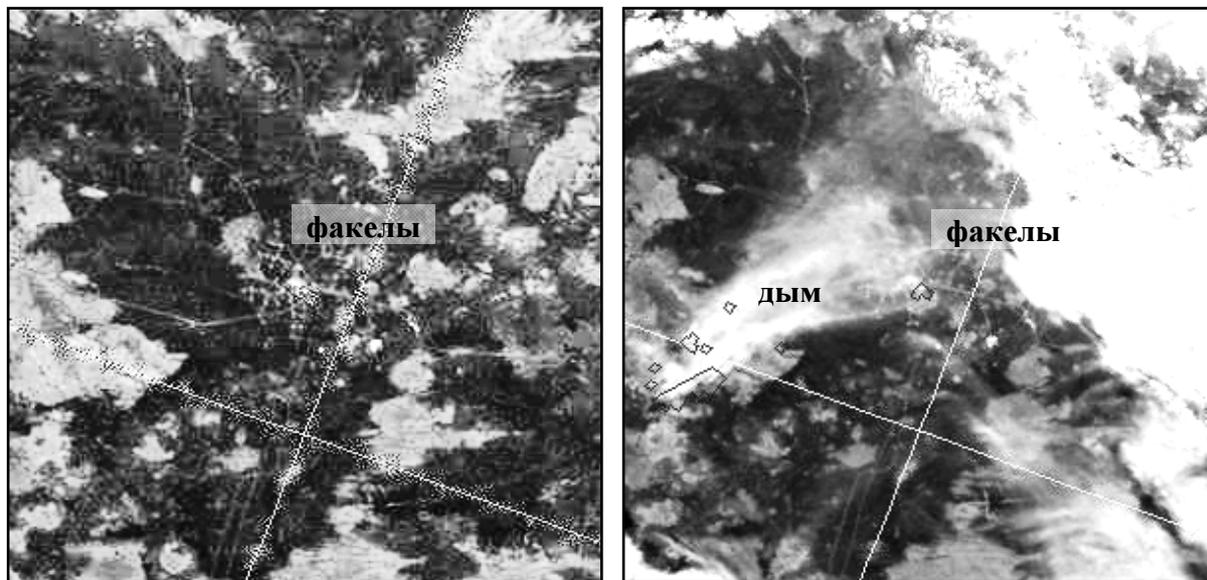
Для этих целей нами был рассмотрен случай температурного зондирования участка Лугинецкого месторождения (58.15°с.ш., 78.89°в.д.) при различных атмосферных условиях. На рис. 1 приведены спутниковые изображения этого участка размером 60x60 км (пространственное разрешение 250 м), полученные в результате композиции трех спектральных каналов видимого диапазона спутниковой системы EOS/MODIS за 2 и 5 июня 2004 года. В центре изображений находятся факельные установки Лугинецкого НГКМ.

Левый снимок представляет ситуацию (А), где отсутствует облачность, а аэрозоль имеет фоновое содержание. На этом снимке 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 **В** уже совсем иная ситуация— наблюдается дым от лесного пожара, плотная и полупрозрачная облачность, которые заметно искажают пространственные контуры подстилающей поверхности. .

2 июня 2004 г.; 12:38

5 июня 2004 г.; 13:15



А: Безоблачная

В: Дым, облачность

Рис. 1. Спутниковые изображения MODIS территории Луганецкого НГКМ

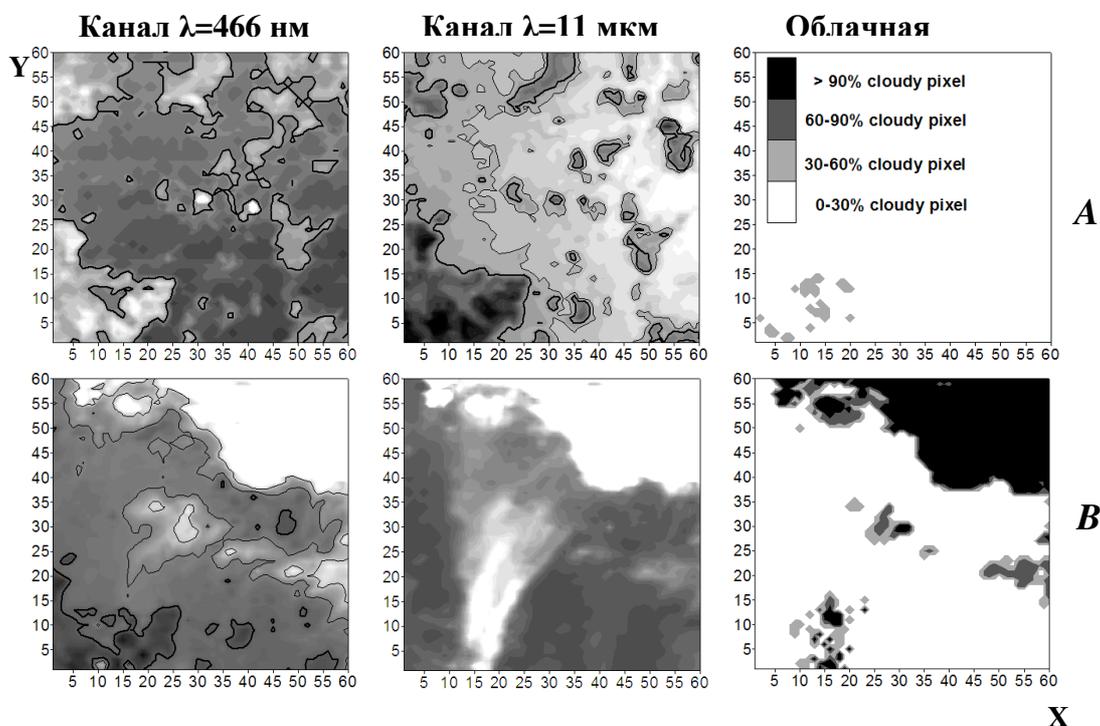


Рис. 2. Спутниковые данные MODIS: значения альbedo в канале $\lambda=466$ нм, яркостные температуры в канале $\lambda=11$ мкм, облачная маска

Спутниковые изображения на рис. 1 дополняются данными рис. 2, которые построены 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 рисунка хорошо выделяются яркие (в канале $\lambda=466$ нм) факельные установки и песчаный карьер (правее установок).

Прежде всего, целесообразно рассмотреть результаты работы штатного SW-алгоритма (файлы MOD11_L2) в обеих рассматриваемых ситуациях. На рис.3 представлены данные обработки файлов MOD11_L2, полученных с сайта Land Processes Distributed Active Archive Center (LP DAAC, <http://edcdaac.usgs.gov/datapool/datapool.asp>).

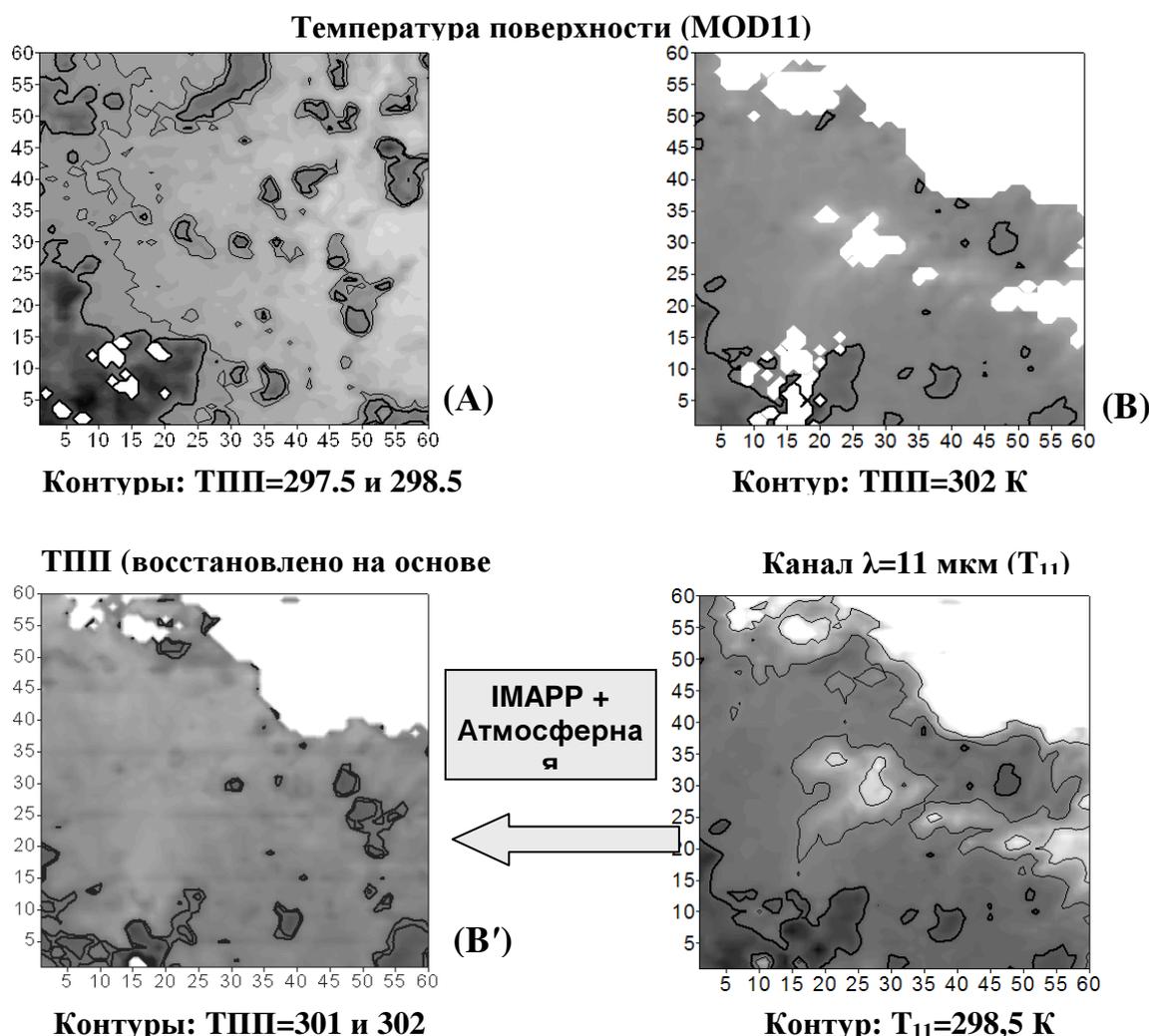


Рис. 3. Результаты восстановления температуры поверхности (ТПП) с помощью стандартного алгоритма MOD11 (верхняя часть рисунка) и на основе RTM-метода (нижняя часть рисунка)

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 (В) 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. 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 в ИОА СО РАН программный комплекс [10], с помощью которого был произведен расчет искажающих характеристик атмосферы для канала $\lambda=11$ мкм (см. нижнюю часть рис.3), осуществлена коррекция измерений яркостных температур T_{11} и получено новое (B') 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 (B) и (B') в пределах 1° . Кроме того восстановлена температура поверхности в окрестности факельных установок ($y=x=30$).

Рассмотрим еще один результат применения RTM-метода – восстановление температуры T_F теплового излучения факельных установок по измерениям яркостных температур T_4 в канале $\lambda=3.96$ мкм:

$$\begin{aligned} B(T_\lambda) &= I_{HOT} + I_{BG}, \\ I_{HOT} &= S(\theta) \varepsilon_\lambda^F B(T_F) P_\lambda; \quad I_{BG} = I_{SRF} + I_{ATM} + I_{RFL} + I_{SCT}, \\ B(T_F) &= (B(T_\lambda) - I_{BG}) / (S(\theta) \varepsilon_\lambda^F P_\lambda), \end{aligned} \quad (5)$$

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_{RFL} – вклад отраженных от поверхности падающих на нее потоков теплового и солнечного излучений, I_{SCT} – 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.

Ниже таблица 2 иллюстрирует результаты решения этой задачи при условии, что диаметр пламени равен 8 метров:

Таблица 2. Результаты восстановления температуры пламени

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
В	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 RTM-метода (рис.3, B').

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 **В** существенно различаются и составляют соответственно 2180 К и 1410 К. Атмосферные искажения измерений из космоса температуры горения факела для ситуации **В** превысили 1000 К.

Применение RTM-метода для обнаружения высокотемпературных объектов

Для проведения тестирования RTM-метода были использованы данные 97 файлов (гранул) телеметрической информации EOS/MODIS (спутник Terra, дневные снимки) за июнь 2006 года, относящихся к территории Западной Сибири. В качестве тестовых объектов для наблюдения были выбраны 13 факельных установок по сжиганию попутного газа на нефтегазовых месторождениях Томской области и юга Тюменской области.

Для отработки спутниковых методов были использованы два варианта штатного алгоритма MOD14_v5.0.1 [20], а также RTM-метод с использованием наших методических разработок и программного обеспечения [10].

В алгоритме MOD14 вначале осуществляется отбор «потенциальных» пожаров:

$$1) T_{21} > 310 \text{ K}, 2) \Delta T > 10 \text{ K}, 3) \rho_{0,86} < 0.3, \quad (6)$$

Далее, для пикселей, отмеченных как «потенциальные пожары», проверяется выполнение ряда тестов:

Тест 1. $T_{21} > 360 \text{ K}$ (320 K для ночных пикселей),

Тест 2. $\Delta T > \Delta T^* + C_1 \cdot \mu_{\Delta T}$, **Тест 3.** $\Delta T > \Delta T^* + C_2$,

Тест 4. $T_{21} > T_{21}^* + C_3 \cdot \mu_{21}$; **Тест 5.** $T_{31} > T_{31}^* + \mu_{31} - C_4$, (7)

где $C_1=3.5$, $C_2=6.0$, $C_3=3.0$, $C_4=4.0$.

С целью повышения чувствительности этого алгоритма для детектирования ВТО с относительно низкой интенсивностью теплового излучения мы реализовали «модификацию» алгоритма MOD14*, которая включала: а) значительное снижение порогов в (5): $T_{21} > 302 \text{ K}$ и $\Delta T > 3.5 \text{ K}$; б) изменение множителей $C_1 \dots C_4$ в (6): $C_1=2.5$, $C_2=5.0$, $C_3=2.0$.

Описание алгоритма на основе RTM-метода

Этап 1. На основе спутниковой телеметрии EOS/MODIS с помощью программы IMAPP определяется априорная оптико-метеорологическая информация о состоянии атмосферы для участков детектирования высокотемпературных источников. Априорная информация включает следующие данные: облачная маска (MOD35), интегральное влагосодержание атмосферы (MOD05), вертикальные профили метеопараметров атмосферы (MOD07), характеристики облачности (MOD06), оптические характеристики аэрозоля (MOD04). Значения излучательной способности пикселей ϵ_λ определяется стандартным образом на основе карт типов подстилающей поверхности и таблиц соответствия ϵ_λ этим типам земной поверхности.

Этап 2. Осуществляется отбраковка случаев водных пикселей, а также пикселей, закрытых плотной облачностью, где для отбраковки использовались данные MOD35, MOD06, MOD05.

Этап 3. Для каналов 21/22 (далее канал 21), 31 и 32 на основе полученной ранее априорной информации осуществляется расчет характеристик искажения теплового излучения с помощью модифицированной версии программы MODTRAN_v3.5. Далее производится атмосферная коррекция, и вычисляются величины $T_{S,21}$, $T_{S,31}$, $T_{S,32}$ – восстановленные в каналах 21, 31, 32 значения ТПП. В случае адекватных профилей температуры и влажности и при отсутствии ВТО должно выполняться условие приближенного равенства $T_{S,21} \approx T_{S,31} \approx T_{S,32}$.

Этап 4. Если $T_{S,31} \neq T_{S,32}$, то одной из причин этого являются ошибки в профилях метеопараметров. В этом случае производится простейшая компенсация этих ошибок путем вычисления поправки вида $\Delta T_S = C_{ERR} \cdot (T_{S,32} - T_{S,31})$ и нового значения $T_{S,31} = T_{S,31} - \Delta T_S$.

Этап 5. В случае влияния перистой и полупрозрачной облачности осуществляется коррекция восстановленных значений ТПП: $T_{S,21} = T_{S,21} + \Delta T_{21,CLD}$, $T_{S,31} = T_{S,31} + \Delta T_{31,CLD}$, где «облачные» поправки определяются на основе расчетных таблиц (*Look-Up-Table*) о влиянии

характеристик облачности на результаты восстановления ТПП и совместного анализа данных MOD35, MOD06, MOD05.

Этап 6. Осуществляется обнаружение ВТО с использованием двух условий.

$$T_{S,21} > 302 \text{ К}, \Delta T = T_{S,21} - T_{S,31} > 3.5 \text{ К}.$$

Результаты детектирования

В таблице 3 приведены результаты детектирования тестовых объектов (факельных установок) с помощью алгоритмов MOD14 (оригинального и модифицированного нами), а также предлагаемого нами RTM-метода температурного мониторинга земной поверхности. В таблице даны: суммарный по всем факелам результат их обнаружений (N_{Σ}), количество обнаружений каждого из них, среднее значение температуры T_{21} для каждого факела ($T_{21,CP}$).

При тестировании алгоритмов было обработано в общей сложности 38128 пикселей в окрестностях ФУ. При этом важно отметить, что условие $T_{S,21} \approx T_{S,31} \approx T_{S,32}$ при отсутствии облачности и ВТО действительно выполняется, что отражает хорошее качество проведения атмосферной коррекции спутниковых измерений ТПП. Так, для выборки из 30985 пикселей, соответствующих условиям безоблачной атмосферы, средние значения восстановленных ТПП составили $T_{S,21}=298.4 \text{ К}$, $T_{S,31}=298.4 \text{ К}$, $T_{S,32}=298.7 \text{ К}$. То есть, погрешность учета молекулярного поглощения в каналах 21/22, 31 и 32 EOS/MODIS была в среднем менее 0.5 К.

Таблица 3. Результаты детектирования 13 тестовых объектов (факельные установки) из космоса с помощью трех спутниковых методов

Методы	N_{Σ}	Факельные установки													
		F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10	X1	X2	X3	
MOD14	60	4	–	–	–	–	–	–	–	–	1	1	14	14	26
MOD14*	83	6	2	–	1	–	1	1	–	6	4	18	18	26	
RTM	122	13	4	3	4	2	8	1	1	8	9	21	21	27	
$T_{21,CP}$		309	304	306	306	305	305	308	303	307	306	314	320	329	

Говоря о сравнительных оценках эффективности трех алгоритмов, необходимо учесть следующий важный момент. Среди тестовых объектов можно выделить три «ярких» ФУ (X1...X3, см. табл.3), расположенных на юге Тюменской области, для которых частота детектирования заметно выше, чем у остальных факелов, и она меньше зависит от выбора метода. Принимая во внимание то обстоятельство, что главные преимущества RTM-метода реализуются при детектировании относительно слабоинтенсивных тепловых источников, целесообразно получить сравнительные оценки применения методов для такого рода источников - десяти ФУ (F1...F10, см. табл.3), расположенных на территории Томской области. В этом случае соотношения N_{Σ} для рассматриваемых трех алгоритмов будут уже равны 6:21:53 (соответственно MOD14 : MOD14* : RTM), и преимущества RTM-метода заметно возрастают.

Сравним эффективность применения RTM-метода и используемого в ИОА СО РАН [7] алгоритма обнаружения очагов лесных пожаров по данным спутниковой системы NOAA POES при детектировании слабоинтенсивных ФУ. В этом случае соотношение N_{Σ} будет равно 36:53, соответственно для алгоритма ИОА и RTM-метода.

Заключение

RTM-метод с использованием оперативных спутниковых метеоданных о состоянии атмосферы в момент спутниковых наблюдений позволяют осуществлять учет искажающего влияния молекулярной атмосферы с погрешностью менее 0.5 К. Применение RTM-метода по принципу “split-window” делает это решение устойчивым к ошибкам задания априорной метеорологической информации.

При проведении температурного зондирования земной поверхности из космоса в сложных оптико-метеорологических условиях наблюдений RTM-метод имеет значительные преимущества перед стандартными подходами.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 08-01-99019 «Прогноз лесной пожарной опасности на территории Томской области» с использованием новой математической модели, суперкомпьютера «СКИФ Cyberia», спутникового мониторинга и геоинформационных систем».

Авторы статьи выражают глубокую признательность зам. директора ИКИ РАН д.т.н. Лупяну Е.А. и к.ф.-м.н. Мазурову А.А., а также директору ЦЭПЛ РАН д.с.-х.н. Коровину Г.Н. и к.т.н. Ершову Д.В. за многолетнюю поддержку этих исследований.

Литература

1. *Becker, F., and Z. L. Li*, Towards a local split window method over land surface // *Int. J. Remote Sens.* 1990. V. 11. No. 3. P. 369–393.
2. *Ottle' C., Vidal-Madjar D.*, Estimation of land surface temperature with NOAA 9 data // *Remote Sens. Environ.* 1992. V. 40. No. 1. P. 27-41.
3. *Li, Z. L., and Becker, F.*, Feasibility of land surface temperature and emissivity determination from AVHRR data // *Remote Sens. Environ.* 1993. V. 43. No. 1. P. 67-85.
4. *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.
5. *Wan, Z., and J. Dozier*, A generalized split-window algorithm for retrieving land surface temperature measurement from space // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 1996. V. 34. No. 4. P. 892– 905.
6. *Mao, K., Z. Qin, J. Shi, and P. Gong*, A practical split-window algorithm for retrieving land surface temperature from MODIS data // *Int. J. Remote Sens.* 2005. V. 26. No. 15. P. 3181– 3204.
7. *Белов В.В., Афонин С.В.* «От физических основ, теории и моделирования к тематической обработке спутниковых изображений» // Томск: изд-во ИОА СО РАН, 2005. 266 с.
8. *Thome K., Palluconi F., Takashima T., Masuda K.* Atmospheric correction of ASTER // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 1998. V. 36. No. 4. P. 1199-1211.
9. *Sobrino J.A., Jiménez-Muñoz J.C., Paolini L.* Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5 // *Remote Sens. Environ.* 2004. V. 90. No. 4. P. 434–440.
10. *Афонин С.В., Соломатов Д.В.* Методика учета оптико-метеорологического состояния атмосферы для решения задач атмосферной коррекции спутниковых ИК-измерений // *Оптика атмосферы и океана*, 2008. Т. 21. № 2. С. 147-153.
11. *Wang P., Karen Y. Liu, Tom Cwik, Robert Green.* MODTRAN on supercomputers and parallel computers // *Parallel Computing.* 2002. V. 28. No. 1. P. 53-64.
12. *Головко В.А.* Современные технологии устранения влияния атмосферы на многоспектральные измерения высокого пространственного разрешения из космоса // *Иссл. Земли из космоса*, 2006. № 2. С. 11-23.
13. *Clough, S. A., M. W. Shephard, E. J. Mlawer, J. S. Delamere, M. J. Iacono, K. Cady-Pereira, S. Boukabara, and P. D. Brown*, Atmospheric radiative transfer modeling: a summary of the AER codes, Short Communication // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* 2005. V. 91. No. 2. P. 233-244.
14. *Rothman L.S., Jacquemart D., Barbe A., D. Chris Benner, Birk M., Brown L.R., Carleer M.R., Chackerian C., Jr., Chance K., Dana V., Devi V.M., Flaud J.-M., Gamache R.R., Goldman A., Hartmann J.-M., Jucks K.W., Maki A.G., Mandin J.-Y., Massie S.T., Orphal J., Perrin A., Rinsland C.P., Smith M.A.H., Tennyson J., Tolchenov R.N., Toth R.A., Vander J. Auwera, Varanasi P., Wagner G.* The HITRAN 2004 Molecular Spectroscopic Database // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* 2005. V. 96. No. 2. P. 139–204.
15. *Mlawer, M.J., D.C. Tobin, S.A. Clough*, A Revised Perspective on the Water Vapor Continuum: The MT_CKD Model // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* 2004. (in preparation) .
16. *Kneizys F.X., L.W. Abreu, G.P. Anderson, J.H. Chetwynd, E.P. Shettle, A. Berk, L.S. Bernstein, D.C. Robertson, P. Acharya, L.S. Rothman, J.E.A. Selby, W.O. Gallery, and S.A. Clough*, The MODTRAN 2/3 Report and LOWTRAN 7 Model, Phillips Laboratory, Hanscom AFB contract F19628-91-C-0132 with Ontar Corp., 1996.

17. Berk A., G. Anderson, P. Acharya, M. Hoke, J. Chetwynd, L. Bernstein, E. Shettle, M. Matthew, and S. Adler-Golden, MODTRAN4 Version 3 Revision 1 User's Manual, Air Force Res. Lab., Hanscom Air Force Base, Mass., 2003.

18. Rothman L.S., Rinsland C.P., Goldman A., Massie S.T., Edwards D.P., Flaud J.-M., Perrin A., Camy-Peyret C., Dana V., Mandin J.Y., Schroeder J., McCann A., Gamache R.R., Wattson R.B., Yoshino K., Chance K.V., Jucks K.W., Brown L.R., Nemtchinov V., Varanasi P., The HITRAN molecular spectroscopic database and HAWKS (HITRAN atmospheric workstation): 1996 edition // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 1998. V. 60. No. 5. P. 665–710.

19. Clough S.A., Kneizys F.X., Davies R.W., Line shape and the water vapor continuum // Atmos. Res. 1989. V. 23. No. 3-4. P. 229–241.

20. Giglio L., Descloitres J., Justice C.O., Kaufman Y.J., An Enhanced Contextual Fire Detection Algorithm for MODIS // Remote Sens. Environ. 2003. V. 83. N 2–3. P. 273–282.

Physical aspects of RTM-method application for solving of thermal infrared remote sensing problem

S.V. Afonin, V.V. Belov, D.V. Solomatov

Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, Tomsk State University

Physical aspects of RTM-method application for solving of thermal infrared remote sensing problem are considered. Quantitative assessments of efficiency of RTM-method application are obtained.

Keywords: land surface temperature, space remote sensing, fires detection, atmospheric correction.