

Решение задач температурного мониторинга земной поверхности из космоса на основе RTM-метода

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

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

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

²Томский государственный университет

634050, г. Томск, пр. Ленина, 36

Поступила в редакцию 8.09.2008 г.

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

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. Для большинства прикладных задач точность такой информации должна быть не хуже 0,5–1 К. К этим задачам можно добавить весьма актуальную проблему оперативного обнаружения и мониторинга чрезвычайных ситуаций – пожары, вулканы, землетрясения и т.д.

В течение последних 25 лет активно развивались спутниковые методы восстановления ТПП [1–8], 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 известная методика дифференциального поглощения для учета искажающего влияния водяного пара.

Общая форма 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}):

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

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 набора метеорологических моделей атмосферы.

Более сложная форма соотношения (1) включает значения излучательной способности ϵ_{11} и ϵ_{12} подстилающей поверхности для этих каналов, их разницу $\Delta\epsilon$, зависимость коэффициентов от влагосодержания, температуры приземного воздуха и зенитного угла наблюдения. Примером этого является штатный алгоритм дистанционных измерений ТПП по данным MODIS [6, 7].

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 (δT_S) существенно зависит от ошибок измерений δT_λ . Так, по данным работы [7] $\delta T_S \approx 6,19\delta T_\lambda$. Для прибора NOAA/AVHRR погрешность измерений $\delta T_\lambda \approx 0,12$ К, т.е. $\delta T_S \approx 0,7$ К, а для системы EOS/MODIS – $\delta T_\lambda \approx 0,05 \pm 0,07$ К, т.е. $\delta T_S \approx 0,3 \pm 0,4$ К.

2. Требуется хорошее знание излучательной способности ϵ_{11} и ϵ_{12} поверхности, а также их разности $\Delta\epsilon$. По данным работ [2, 3] для уровня $\delta T_S \approx 0,5$ К относительная погрешность задания ϵ должна быть не более $\delta\epsilon \approx 0,5 \pm 1\%$, а для $\Delta\epsilon$ не хуже $0,25 \pm 0,5\%$.

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 при этом отсутствует учет искажений, вызванных аэрозолями и перистой облачностью.

Таким образом, используемые на практике штатные методы восстановления ТПП не обеспечивают надежного и универсального решения проблемы атмосферной коррекции ИК-измерений, особенно в сложных («нестандартных») условиях наблюдений.

* Сергей Васильевич Афонин (afonin@iao.ru); Владимир Васильевич Белов (belov@iao.ru); Дмитрий Владимирович Соломатов (solomatov@iao.ru).

Другой, более корректный, подход заключается в использовании моделей переноса теплового излучения (Radiative Transfer Model). В рамках RTM-метода осуществляется учет искажающих характеристик атмосферы с использованием широко известных компьютерных программ типа LOWTRAN-7, MODTRAN, 6S, ATCOR и др. на основе априорной оптико-метеорологической информации о состоянии атмосферы в момент спутниковых наблюдений. Примеры использования такого подхода: атмосферная коррекция данных радиометров MSU-CK, NOAA/AVHRR, Landsat, ASTER [9–12].

Такой метод, безусловно, обеспечивает универсальность и явный учет всех искажающих факторов при решении задачи восстановления ТПП из космоса, хотя реализация его на практике требует привлечения большого объема оперативной априорной информации требуемого качества и высокой скорости вычислений.

Интенсивное развитие вычислительной техники и современных технологий параллельного программирования [13, 14] позволяет снять вопрос о трудоемкости проведения большого объема вычислений. Кроме того, в [12] предлагается использовать комбинированный подход — быстрый SW-метод для «стандартных» ситуаций и RTM-метод для ситуаций, выходящих за их рамки (при наличии аэрозоля, полупрозрачной или перистой облачности). Там же дано описание программного комплекса, который с помощью доступных пользователю программных средств (IMAPP, MODTRAN) позволяет на основе спутниковой информации EOS/MODIS реализовать RTM-метод для комплексного температурного мониторинга земной поверхности, включая восстановление ТПП и мониторинг высокотемпературных объектов (ВТО) — очагов пожаров и промышленных тепловых источников.

В настоящей статье проведен анализ различных аспектов применения RTM-метода с использованием ИК-каналов температурного мониторинга земной поверхности (20, 21/22, 31, 32) прибора EOS/MODIS, получены количественные оценки эффективности его применения (по сравнению со стандартным подходом) для обнаружения ВТО.

1. Искажения теплового излучения молекулярной атмосферой

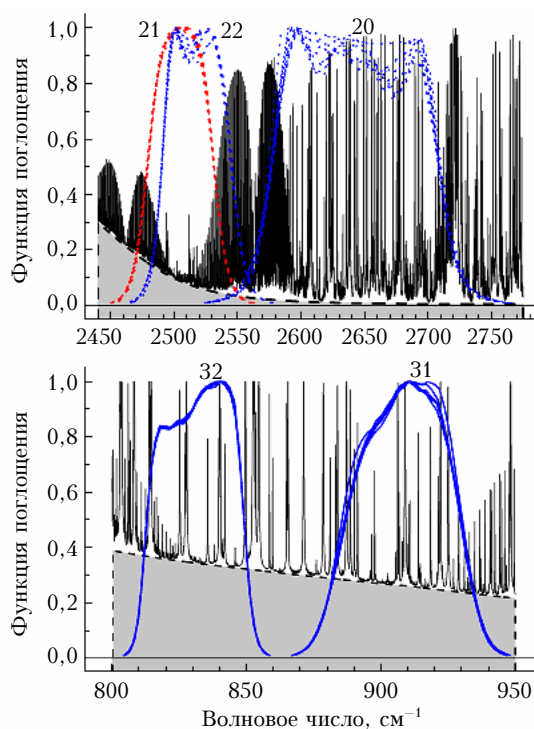
Известно, что в число основных факторов молекулярного искажения теплового излучения в каналах EOS/MODIS входят: селективное поглощение спектральными линиями атмосферных газов и континуальное поглощение крыльями линий H_2O и N_2 . Несмотря на имеющиеся в литературе оценки влияния этих факторов на характеристики 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) [15],

в основе которого — база данных параметров спектральных линий HITRAN-2004 [16] (включая все изменения до 01.01.2007) и модели молекулярного континуума MT_CKD_2.1 [17].

1.1. 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 легко 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 . На рисунке для условий лета средних широт представлены результаты расчетов с помощью LBLRTM_v11.3 функции поглощения теплового излучения в рассматриваемых каналах прибора EOS/MODIS.



Поглощение теплового излучения в спектральных каналах 20, 21/22, 31 и 32 спутниковой системы EOS/MODIS. Лето средних широт. Серый фон — континуум, пики — линии + континуум

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 найти разницу

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

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

В табл. 1 приведены результаты оценки δT_{λ} , позволяющие сформулировать некоторые выводы.

1) Прежде всего, очевиден тот факт, что влияние селективного поглощения атмосферными газами во всех каналах EOS/MODIS превосходит уровень 0,25 К и, следовательно, требует его учета в рамках RTM-метода.

2) В каналах 20 и 21 искажающее влияние селективного поглощения определяется линиями молекул H_2O , N_2O и CH_4 .

3) В каналах 31 и 32 достаточно учитывать только вклад линий H_2O и в значительно меньшей степени вклад линий CO_2 .

Таким образом, говоря о проблеме оперативно-го задания достоверной априорной метеоинформации, в рамках RTM-метода это фактически касается только профилей температуры и влажности.

Еще одно важное условие успешного применения RTM-метода на практике – это хорошая точность и высокая скорость вычислений коэффициентов селективного поглощения при обработке больших объемов спутниковой информации. Очевидно, что непосредственное использование *LBL*-методов в рамках RTM-метода невозможно в силу их трудоемкости, поэтому необходимо применять проверенные практикой и доступные широкому пользователю упрощенные модели переноса излучения, например широко известную программу MODTRAN. В настоящее время программа MODTRAN_v4.x [19] является коммерческим продуктом, но ее предыдущая версия MODTRAN_v3.x [18] и ее коды (что важно) доступны пользователю. В табл. 1 приведены данные расчета $\delta T_{\lambda}(\text{mol})$ с использованием программы MODTRAN_v3.5, в основе которой – база параметров спектральных линий HITRAN-96 [20] и модели

молекулярного континуума CKD_v2.1_rev.3.3 [21]. Результаты сравнения значений $\delta T_{\lambda}(\text{mol})$, 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.

1.2. 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 оказывает континуальное поглощение крыльями линий интенсивных полос H_2O , CO_2 , O_3 , N_2 , лежащих вне этих спектральных каналов (см. рисунок). Для окна атмосферной прозрачности 3,5–4 мкм характерен слабый континуум H_2O , а для волновых чисел $\nu < 2600 \text{ см}^{-1}$ – более сильный континуум N_2 . В окне прозрачности 10–13 мкм доминирует сильный континуум H_2O и присутствует очень слабый континуум CO_2 . Континуум H_2O представляется двумя составляющими, которые соответствуют самоуширению линий ($\text{H}_2\text{O} - \text{H}_2\text{O}$) и уширению линий воздухом ($\text{H}_2\text{O} - \text{AIR}$).

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

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

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

В табл. 2 приведены результаты расчетов $\delta T_{\lambda}(\text{cont})$, анализ которых позволяет сделать следующие выводы.

Таблица 1

Оптическая толщина атмосферных газов τ и величина искажения радиационной температуры $\delta T_{\lambda}(\text{mol})$, К. Лето средних широт

Молекула	Спектральный канал							
	20		21		31		32	
	τ	δT_{λ}	τ	δT_{λ}	τ	δT_{λ}	τ	δT_{λ}
Данные LBLRTM_v11.3								
H_2O	0,1267	0,935	0,0035	0,020	0,0859	0,685	0,0827	0,662
CO_2	0,0013	0,022	0,0017	0,027	0,0027	0,034	0,0049	0,070
O_3							0,0003	0,015
N_2O	0,0175	0,319	0,0174	0,260				
CH_4	0,0102	0,145	0,0045	0,067				
Остальные							0,0007	0,015
Все	0,1572	1,420	0,0273	0,376	0,0915	0,857	0,0889	0,765
Все (Тропики)	0,1949	1,923	0,0298	0,436	0,1209	1,151	0,1155	0,994
Данные MODTRAN_v3.5								
H_2O	0,1288	0,926	0,0040	0,022	0,0756	0,615	0,0911	0,772
Все	0,1584	1,416	0,0315	0,429	0,0876	0,969	0,0979	0,896
Все (Тропики)	0,1969	1,917	0,0342	0,496	0,1126	1,231	0,1239	1,119

Таблица 2

Оптическая толщина компонентов молекулярного континуума τ и величина искажения радиационной температуры δT_λ (cont), К. Лето средних широт

Компонент	Спектральный канал							
	20		21		31		32	
	τ	δT_λ	τ	δT_λ	τ	δT_λ	τ	δT_λ
Данные LBLRTM_v11.3								
H ₂ O–H ₂ O	0,0019	0,008	0,0029	0,013	0,2959	1,400	0,3956	1,825
H ₂ O–AIR	0,0026	0,014	0,0001	0,000	0,0112	0,072	0,0278	0,174
CO ₂	0,0003	0,003	0,0034	0,041	0,0001	0,002	0,0003	0,006
N ₂	0,0058	0,067	0,1052	1,251				
Все	0,0106	0,093	0,1115	1,309	0,3072	1,483	0,4237	2,032
Все (Тропики)	0,0131	0,119	0,1135	1,454	0,5525	3,064	0,7558	4,060
Данные MODTRAN_v3.5								
H ₂ O–H ₂ O	0,0044	0,020	0,0061	0,027	0,3188	1,491	0,4390	1,986
H ₂ O–AIR	0,0034	0,018	0,0002	0,001	0,0008	0,005	0,0049	0,030
N ₂	0,0074	0,093	0,1174	1,445				
Все	0,0152	0,131	0,1236	1,475	0,3196	1,497	0,4439	2,022
Все (Тропики)	0,0199	0,173	0,1278	1,647	0,5849	3,170	0,8099	4,144

1) Для каналов 20 и 21 влияние континуумов H₂O и CO₂ на величину радиационной температуры составляет менее 0,05 К. Влияние континуума N₂ в канале 20 имеет такой же порядок величины, но заметно возрастает в канале 21, превышая уровень 1 К.

2) Для каналов 31 и 32 доминирует компонент H₂O–H₂O ($\approx 1-2$ К) и значительно меньшее влияние оказывает компонент H₂O–AIR (менее 0,2 К). Влияние континуума CO₂ практически незначимо (менее 0,01 К).

3) Сравнивая значения $\delta T_\lambda(\text{cont})$, полученные на основе программ LBLRTM_v11.3 и MODTRAN_v3.5, можно отметить тот факт, что различия этих значений в каналах 20, 31 и 32 составляют менее 0,1 К и лишь в канале 21 увеличиваются до 0,2 К за счет континуума N₂.

1.3. 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 искажающего влияния атмосферы при использовании достоверной априорной информации 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) в заданный профиль вносились того или иного рода изменения $\delta X(z)$ и вычислялась величина $T_\lambda(\delta X)$ для «искаженного» профиля; 3) вычислялась разница $\delta T_\lambda(\delta X) = T_\lambda(0) - T_\lambda(\delta X)$, определяющая степень влияния ошибок задания метеопараметров на величину радиационной температуры.

В табл. 3 представлены результаты расчетов $\delta T_\lambda(\delta X)$ для температуры и влагосодержания воздуха, содержания остальных атмосферных газов.

Таблица 3

Изменение радиационной температуры за счет вариаций профилей метеопараметров: температуры δT_{AIR} и влажности $\delta W_{\text{H}_2\text{O}}$ воздуха, содержания малых атмосферных газов δW_{GAS} . Данные LBLRTM_v11.3

Параметр	Спектральный канал			
	20	21	31	32
<i>Лето средних широт</i>				
$\delta T_{\text{AIR}} = +2$ К	+0,206	+0,150	+0,632	+0,786
$\delta W_{\text{H}_2\text{O}} = +20\%$	-0,153	-0,010	-0,659	-0,820
$\delta W_{\text{GAS}} = +40\%$	-0,168	-0,151	-0,068	-0,043
<i>Тропики</i>				
$\delta T_{\text{AIR}} = +2$ К	+0,241	+0,147	+0,968	+1,170
$\delta W_{\text{H}_2\text{O}} = +20\%$	-0,218	-0,020	-1,199	-1,418
$\delta W_{\text{GAS}} = +40\%$	-0,186	-0,169	-0,075	-0,043

Для температуры и влагосодержания воздуха были выбраны значения $\delta T_{\text{AIR}} = +2$ К или $\delta W_{\text{H}_2\text{O}} = +20\%$ на всех высотных уровнях. Их можно рассматривать как характерные погрешности восстановления метеопараметров атмосферы по данным прибора EOS/MODIS [22]. Для профилей других атмосферных газов в качестве некоей предельной величины было выбрано значение $\delta W_{\text{GAS}} = +40\%$. Таким образом, данные табл. 3 в целом отражают максимальное влияние погрешностей профилей метеопараметров на T_λ . С учетом предельного характера оценок эти данные позволяют сделать следующие выводы.

1) В каналах 20 и 21 влияние вариации профилей всех метеопараметров 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. Влияние же ошибок задания профилей температуры и влажности воздуха является значимым ($\delta T_\lambda > 0,5$ К) для корректного учета молекулярного искажения теплового излучения в рамках RTM-метода. При этом абсолютная величина δT_λ определяется степенью поглощения теплового излучения в канале и, следовательно, $|\delta T_\lambda|$ в канале 31 меньше, чем в канале 32. Это обстоятельство можно использовать для компенсации влияния ошибок задания метеопараметров при использовании RTM-метода.

3) Следует отметить тот факт, что одинаковый знак у величин δT_{AIR} и $\delta W_{\text{H}_2\text{O}}$ соответствует разным по знаку значениям δT_λ . То есть при наличии положительной корреляции между δT_{AIR} и $\delta W_{\text{H}_2\text{O}}$ 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 важных моментов. Во-первых, анализ спутниковых методов восстановления профилей температуры и влажности [22] позволяет с большой степенью уверенности предположить, что ошибки восстановления температуры и влажности имеют как раз положительную корреляцию. Во-вторых, разница по величине $\delta T_\lambda(\delta X)$ в каналах 31 и 32 позволяет предложить компенсацию влияния δX путем применения RTM-метода по принципу «split-window», т.е. значение ТПП определяется следующим образом:

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

где $T_{S,31}$ и $T_{S,32}$ – значения ТПП, восстановленные в каналах 31 и 32; $C_{\text{ERR}} \approx 2,0$ – коэффициент, полученный на основе результатов имитационных расчетов. В этом случае будет обеспечиваться устойчивость RTM-метода к ошибкам задания априорной метеоинформации.

2. Применение RTM-метода для обнаружения высокотемпературных объектов

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

Выбор факельных установок (ФУ) в качестве тестовых объектов был определен стационарностью их работы и необходимым для их идентификации знанием географических координат ФУ. Таким образом, факельные установки представляли собой

совокупность тепловых объектов разной интенсивности, на основе которых можно эффективно осуществлять обработку методов детектирования ВТО из космоса при различных условиях спутниковых наблюдений.

Для обработки спутниковых методов были использованы два варианта штатного алгоритма MOD14_v5.0.1 [23], а также RTM-метод с использованием наших методических разработок и программного обеспечения [12].

2.1. Описание алгоритма MOD14

После идентификации облачных и водных пикселей производится определение «потенциальных» пожаров с использованием трех условий:

$$1) T_{21} > 310 \text{ К}; 2) \Delta T > 10 \text{ К}; 3) \rho_{0,86} < 0,3, \quad (5)$$

где T_{21} и T_{31} – радиационные температуры в каналах 21/22 и 31 прибора EOS/MODIS; $\rho_{0,86}$ – коэффициент отражения в канале 2 прибора EOS/MODIS; $\Delta T = T_{21} - T_{31}$.

Затем для фоновых пикселей, соседних с «потенциальными пожарами», определяются следующие статистические характеристики: средние значения (T_{21}^* , T_{31}^* , ΔT^*) и средние абсолютные отклонения (μ_{21} , μ_{31} , $\mu_{\Delta T}$) для T_{21} , T_{31} , ΔT соответственно.

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

Тест 1. $T_{21} > 360$ К (320 К для ночных пикселей).

$$\text{Тест 2. } \Delta T > \Delta T^* + C_1 \mu_{\Delta T}.$$

$$\text{Тест 3. } \Delta T > \Delta T^* + C_2. \quad (6)$$

$$\text{Тест 4. } T_{21} > T_{21}^* + C_3 \mu_{21}.$$

$$\text{Тест 5. } T_{31} > T_{31}^* + \mu_{31} - C_4.$$

$$(C_1 = 3,5, C_2 = 6,0, C_3 = 3,0, C_4 = 4,0).$$

После проведения тестов пиксель признается пожаром, если выполняются условия:

а) тест 1 или (тест 2 + тест 3 + тест 4 + тест 5) – для дневных пикселей;

б) тест 1 или (тест 2 + тест 3 + тест 4) – для ночных пикселей.

Для повышения чувствительности этого алгоритма при детектировании ВТО с относительно низкой интенсивностью теплового излучения мы осуществили «модификацию» алгоритма MOD14, которая включала:

а) значительное снижение порогов (5): $T_{21} > 302$ К (ранее 310 К) и $\Delta T > 3,5$ К (10 К);

б) изменение коэффициентов $C_1 \dots C_4$ (6): $C_1 = 2,5$, $C_2 = 5,0$, $C_3 = 2,0$.

2.2. 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 де-

тектирования высокотемпературных источников. Априорная информация включает следующие данные:

- пространственное разрешение 1 км – облачная маска (MOD35), интегральное влагосодержание атмосферы (MOD05);

- пространственное разрешение 5 км – вертикальные профили геопотенциала, температуры и влажности воздуха, содержания озона (MOD07), характеристики облачности (MOD06);

- пространственное разрешение 10 км – оптические характеристики аэрозоля (MOD04).

Значения излучательной способности пикселей ϵ_λ определяются 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 на основе решения уравнения переноса теплового излучения вычисляются $T_{S,21}$, $T_{S,31}$, $T_{S,32}$ – восстановленные в каналах 21, 31, 32 значения ТПП. Для корректных 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 таких ошибок путем вычисления поправки вида $\Delta T_S = C_{ERR}(T_{S,32} - T_{S,31})$ 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*) влияния характеристик облачности на результаты восстановления ТПП и совместного анализа данных MOD35, MOD06, MOD05.

Этап 6. Осуществляется обнаружение ВТО с использованием двух условий:

$$T_{S,21} > 302 \text{ К}, \Delta T = T_{S,21} - T_{S,31} > 3,5 \text{ К}.$$

2.3. Результаты детектирования

В табл. 4 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 табл. 4 даны: суммарный по всем факелам результат их обнаружений (N_Σ), количество обнаружений каждого из них, среднее значение температуры $T_{21,CP}$ 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 $T_{S,21} \approx T_{S,31} \approx T_{S,32}$ в отсутствие 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, получены средние значения восстановленных ТПП: $T_{S,21} = 298,4 \text{ К}$, $T_{S,31} = 298,4 \text{ К}$, $T_{S,32} = 298,7 \text{ К}$. То есть погрешность учета молекулярного поглощения в каналах 21/22, 31 и 32 EOS/MODIS была в среднем менее 0,5 К.

Количество обнаружений ФУ с помощью алгоритма MOD14 v5.0.1 N_Σ составило 60, при этом наблюдались 6 тестовых объектов из 13. Для модифицированного нами алгоритма MOD14_v5.0.1 (MOD14*) количество обнаружений ФУ $N_\Sigma = 83$, и всего наблюдалось 10 тестовых объектов. С помощью RTM-метода количество обнаружений ФУ N_Σ достигло 122, и с разной частотой наблюдались все 13 тестовых объектов.

Таким образом, эффективность RTM-метода в среднем превосходит штатный алгоритм MOD14_v5.0.1 в 2 раза. В модифицированной версии алгоритма MOD14* пороги отбора «потенциальных очагов» совпадают с порогами RTM-метода. Однако и здесь эффективность RTM-метода значительно (почти в 1,5 раза) превосходит эффективность MOD14*.

Говоря о сравнительных оценках эффективности трех алгоритмов, необходимо учесть следующий важный момент. Среди тестовых объектов можно выделить три «ярких» ФУ (X1...X3, см. табл. 4), 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,

Таблица 4

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

Метод	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	

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. 4), 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 [9] 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.

Таким образом, наиболее эффективным из всех рассмотренных спутниковых методов является предлагаемый нами RTM-метод, затем следует алгоритм ИОА и в заключение списка два варианта алгоритма MOD14.

Заключение

RTM-метод с использованием оперативных спутниковых метеоданных о состоянии атмосферы в момент спутниковых наблюдений позволяет 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 детектировании высокотемпературных источников RTM-метод имеет значительные преимущества перед стандартными подходами, особенно для задачи обнаружения слабоинтенсивных очагов в сложных оптико-метеорологических условиях наблюдений.

1. Becker F., Li Z.L. Towards a local split window method over land surface // Int. J. Remote Sens. 1990. V. 11. N 3. P. 369–393.
2. Otte' C., Vidal-Madjar D. Estimation of land surface temperature with NOAA 9 data // Remote Sens. Environ. 1992. V. 40. N 1. P. 27–41.
3. Li Z.L., Becker F. Feasibility of land surface temperature and emissivity determination from AVHRR data // Remote Sens. Environ. 1993. V. 43. N 1. P. 67–85.
4. Sobrino J.A., Li Z.L., Stoll M.P., Becker F. Improvements in the split window technique for land surface temperature determination // IEEE Trans. Geosci. and Remote Sens. 1994. V. 32. N 2. P. 243–253.
5. 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.
6. Wan Z., Dozier J. A generalized split-window algorithm for retrieving land surface temperature measurement from space // IEEE Trans. Geosci. and Remote Sens. 1996. V. 34. N 4. P. 892–905.
7. Wan Z. MODIS Land-Surface Temperature Algorithm Theoretical Background Document (LST ATBD), version 3.3 Inst. for Comput. Earth Syst. Sci., Univ. of Calif., Santa Barbara 1999. [Электронный ресурс]: http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod11.pdf.
8. Mao K., Qin Z., Shi J., Gong P. A practical split-window algorithm for retrieving land surface temperature from MODIS data // Int. J. Remote Sens. 2005. V. 15. N 15. P. 3181–3204.
9. 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.
10. Thome K., Palluconi F., Takashima T., Masuda K. Atmospheric correction of ASTER // IEEE Trans. Geosci. and Remote Sens. 1998. V. 36(4). P. 1199–1211.
11. Sobrino J.A., Jiménez-Muñoz J.C., Paolini L. Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5 // Remote Sens. Environ. 2004. V. 90. N 4. P. 434–440.
12. Афонин С.В., Соломатов Д.В. Методика учета оптико-метеорологического состояния атмосферы для решения задач атмосферной коррекции спутниковых ИК-измерений // Оптика атмосф. и океана. 2008. Т. 21. № 2. С. 147–153.
13. Wang P., Karen Y.L., Cwik T., Green R. MODTRAN on supercomputers and parallel computers // Parallel Computing. 2002. V. 28. Issue 1. P. 53–64.
14. Головкин В.А. Современные технологии устранения влияния атмосферы на многоспектральные измерения высокого пространственного разрешения из космоса // Исслед. Земли из космоса. 2006. № 2. С. 11–23.
15. Clough S.A., Shephard M.W., Mlawer E.J., Delamere J.S., Iacono M.J., Cady-Pereira K., Boukabara S., Brown P.D. Atmospheric radiative transfer modeling: a summary of the AER codes, Short Communication // J. Quant. Spectrosc. and Radiat. Transfer. 2005. V. 91. N 2. P. 233–244.
16. Rothman L.S., Jacquemart D., Barbe A., Benner D.C., 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. and Radiat. Transfer. 2005. V. 96. N 2. P. 139–204.
17. Mlawer M.J., Tobin D.C., Clough S.A. A Revised Perspective on the Water Vapor Continuum: The MT_CKD Model // J. Quant. Spectrosc. and Radiat. Transfer. 2004 (in press).
18. Kneizys F.X., Abreu L.W., Anderson G.P., Chetwynd J.H., Shettle E.P., Berk A., Bernstein L.S., Robertson D.C., Acharya P., Rothman L.S., Selby J.E.A., Gallery W.O., Clough S.A. The MODTRAN 2/3 Report and LOWTRAN 7 Model, Phillips Laboratory, Hanscom AFB contract F19628-91-C-0132 with Ontar Corp. 1996.
19. Berk A., Anderson G., Acharya P., Hoke M., Chetwynd J., Bernstein L., Shettle E., Matthew M., Adler-Golden S. MODTRAN4 Version 3 Revision 1 User's Manual, Air Force Res. Lab., Hanscom Air Force Base, Mass. 2003.
20. 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., Schröder 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 edi-

- tion // J. Quant. Spectrosc. and Radiat. Transfer. 1998. V. 60. N 5. P. 665–710.
21. *Clough S.A., Kneizys F.X., Davies R.W.* Line shape and the water vapor continuum // Atmos. Res. 1989. V. 23. N 3–4. P. 229–241.
22. *Seemann S.W., Li J., Menzel W.P., Gumley L.E.* Operational retrieval of atmospheric temperature, moisture, and ozone from MODIS infrared radiances // J. Appl. Meteorol. 2003. V. 42. N 8. P. 1072–1091.
23. *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.

S.V. Afonin, V.V. Belov, D.V. Solomatov. **Space monitoring of the Earth surface temperature based on RTM method.**

Physical aspects of the RTM method application to problems of space monitoring of the underlying surface are considered. Quantitative estimates of the method efficiency for detection of high-temperature objects are obtained.