

Результаты атмосферной коррекции данных космомониторинга высокотемпературных аномалий

С.В. Афонин, В.В. Белов

*Институт оптики атмосферы СО РАН,
634055 Томск, пр. Академический, 1
E-mail: belov@iao.ru*

В данной работе по спутниковым измерениям *NOAA* восстановлены яркостные характеристики двух малоразмерных стационарных высокотемпературных объектов (расположенных на территории Томской области) с использованием оперативной информации о реальных оптико-метеорологических и геометрических условиях спутниковых наблюдений.

Введение

При дистанционном зондировании подстилающей поверхности из космоса решается актуальная задача оперативного обнаружения очагов пожаров в лесах и на промышленных объектах. При этом важно обнаружить пожар еще на ранней стадии развития (площадь менее 5–10 га), когда его ликвидация ещё не требует больших усилий. В настоящее время для глобального мониторинга лесных пожаров широко используются приборы *NOAA/AVHRR* со спектральными каналами $\lambda = 0.63$ мкм (№1), 0.84 мкм (№2), 1.6 мкм (№3а), 3.75 мкм (№3), 10.8 мкм (№4) и 12.0 мкм (№5) а также прибор *EOS/MODIS* (36 спектральных каналов), имеющие максимальное пространственное разрешение (IFOV) порядка 1 км². В этом случае требуется применение надежных алгоритмов автоматического распознавания на спутниковых ИК-изображениях малоразмерных высокотемпературных аномалий площадью менее 0.1% от IFOV. Для достижения максимальной точности решения этой задачи целесообразно проведение атмосферной коррекции спутниковых инфракрасных измерений с использованием информации о метеорологических и аэрозольных характеристиках атмосферы с учетом геометрии наблюдений.

Анализ литературных данных об алгоритмах детектирования очагов пожаров из космоса [см., например 1–3] позволяет сделать следующий вывод. В большинстве применяемых на практике алгоритмах детектирования пожаров используется решающее правило $P\{x\} > dP$, где величина dP является пороговым значением функции $P\{x\}$, а ее параметры $\{x\}$ обычно являются спутниковыми измерениями альbedo и яркостных температур (или их функциями). Значения порога dP устанавливаются фиксированными или могут быть определены на основе статистических характеристик, вычисленных для $\{x\}$ в окрестности потенциального пожара. В наиболее простом варианте в качестве $\{x\}$ используют яркостную температуру T_3 3-го канала ($\lambda = 3.75$ мкм) и разницу температур dT_{34} в каналах №3 и №4. Однако, используемые на практике алгоритмы фактически не учитывают в явном виде оптико-геометрические условия проведения спутниковых измерений.

В Институте оптики атмосферы СО РАН проводятся работы по изучению искажающего влияния атмосферы на результаты мониторинга подстилающей поверхности из космоса [см., например, 4–9]. В данной работе сделана попытка определения по спутниковым измерениям *NOAA* яркостных характеристик двух расположенных на территории Томской области малоразмерных стационарных высокотемпературных объектов с использованием оперативной информации о реальных оптико-метеорологических и геометрических условиях спутниковых наблюдений.

Восстановление из космоса яркостных характеристик малоразмерного очага пожара

Сформулируем из [9] основные соотношения алгоритма восстановления из космоса яркостных характеристик малоразмерного очага пожара. Пусть на некотором участке подстилающей поверхности (ПП) площадью S_0 , соответствующей углу поля зрения радиометра, и температурой T_0 есть малоразмерный очаг пожара площадью S_F ($S_F \ll S_0$) и температурой $T_F > 600K$.

Интенсивность I_λ восходящего потока теплового излучения можно записать следующим образом:

$$I_\lambda = B_\lambda(T_\lambda), \quad I_\lambda = I_{HOT} + I_{BG}, \quad (1)$$

где $B(T_\lambda)$ – функция Планка, T_λ – радиационная температура теплового излучения; I_{HOT} – интенсивность ослабленного атмосферой излучения очага, I_{BG} – интенсивность излучения фона.

Вклад теплового излучения в измеряемую интенсивность I_λ можно записать в виде:

$$I_{HOT} = B_{HOT} P_\lambda, \quad B_{HOT} = R(\theta) \varepsilon_\lambda^F B_\lambda(T_F), \quad R(\theta) = S_F/S_0(\theta),$$

где $P_\lambda = \exp\{-\tau_\lambda/\cos(\theta)\}$ – пропускание атмосферы, τ_λ – оптическая толщина атмосферы, θ – угол сканирования оси прибора, ε_λ^F – излучательная способность теплового источника.

Вклад фона в измеряемую интенсивность I_λ можно представить в виде суммы четырех слагаемых:

$$I_{BG} = I_{SRF} + I_{ATM} + I_{RFL} + I_{SCT}, \quad (2)$$

где 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.

Отметим, что

$$I_{SRF} = (1 - R(\theta)) \varepsilon_\lambda^0 B_\lambda(T_0) P_\lambda, \quad (3)$$

где ε_λ^0 – излучательная способность ПП, T_0 – фоновая температура ПП.

Для иллюстрации приведенных выше физических характеристик в таблице 1 представлены результаты численного моделирования для условий наблюдений в Томске (май-сентябрь 1999 г.).

Таблица 1.

Visibility (<i>V</i> is)	I_{BG}	P_λ	τ_λ^{aer}	Относительный вклад в I_{BG} (%)		
				$I_{SRF}+I_{ATM}$	I_{RFL}	I_{SCT}
mol (<i>no aerosol</i>)	0.46435	0.74648	0	89.77	10.22	0.02
40 km, rur	0.46510	0.73267	0.01867	88.58	9.95	1.47
40 km, urb	0.46356	0.72971	0.02272	88.96	9.83	1.21
20 km, rur	0.46592	0.71791	0.03902	87.35	9.68	2.97
10 km, rur	0.46691	0.68934	0.07963	85.07	9.19	5.74
5 km, rur	0.46854	0.64510	0.14596	81.33	8.45	10.21
2 km, rur	0.47356	0.53298	0.33688	71.06	6.67	22.27
2 km, urb	0.45236	0.49339	0.41407	77.14	5.25	17.60
mol vs 2 км rur	+1.98 %	- 28.60%				
mol vs 2 км urb	- 2.58 %	- 33.90%				

С точки зрения корректного учета оптико-геометрических условий наблюдений задачу обнаружения из космоса малоразмерного высокотемпературного объекта следует решать путем восстановления в 3-ем канале *AVHRR* ($\lambda = 3.75$ мкм) интенсивности B_{HOT} :

$$B_{HOT} = (I_3 - I_{BG}) / P_3, \quad (4)$$

где I_3 – измеряемая интенсивность теплового излучения, а величины I_{BG} и P_3 вычисляются на основе априорной оптико-метеорологической информации.

В этом случае решающее правило обнаружения очага лесного пожара из космоса $B_{HOT} > dB$ будет *независимым* от оптико-геометрических условий наблюдений. Для достижения этой цели необходима информация о характеристиках подстилающей поверхности, об оптических и метеорологических параметрах атмосферы.

Результат атмосферной коррекции спутниковых данных в задаче обнаружения малоразмерных высокотемпературных объектов из космоса

Рассмотренный в разделе 1 подход к атмосферной коррекции результатов мониторинга из космоса высокотемпературных объектов (ВТО) был применен на практике для обработки спутниковых данных NOAA/AVHRR. На рисунке 1 представлен фрагмент изображения, полученного утром (в 07:56 местного времени) 21 мая 2001 года со спутника NOAA-14.

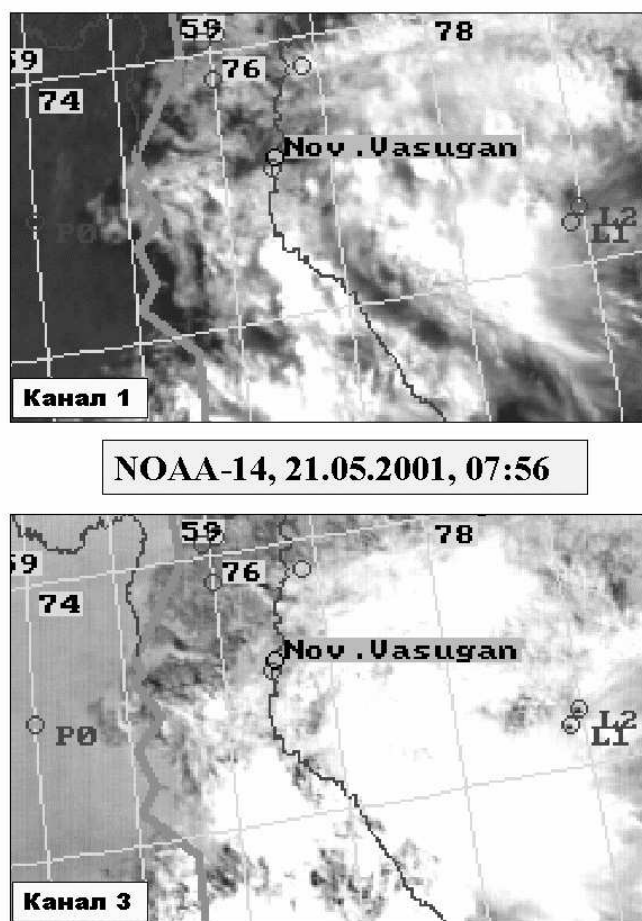


Рис. 1. Фрагмент спутникового изображения двух высокотемпературных объектов $L1$ и $L2$, $P0$ – точка характеризуется безоблачной ситуацией; спутник NOAA-14, дата – 21.05.2001, местное время – 07:56; спектральные каналы AVHRR – 0,63 мкм ($N\#1$) и 3,75 мкм ($N\#3$)

На фрагменте (канале 3) в точках $L1$ и $L2$ хорошо наблюдаются два стационарных высокотемпературных объекта (petroleum gas flare). Наблюдение этих объектов из космоса характеризуется достаточно сложными оптическими условиями, так как в окрестностях точек $L1$ и $L2$ присутствует

разорванная облачность. При этом, из визуальных данных следует отметить более высокую оптическая плотность облачности именно вокруг точки $L1$.

На изображении также выделена точка $P0$, которая характеризуется безоблачными условиями спутниковых измерений. Полученные в её окрестности данные позволяют осуществить оценки метеорологических параметров атмосферы (вертикальные профили температуры и влажности) и фоновой температуры подстилающей поверхности.

Характеристики измерений в точках $L1$, $L2$ и $P0$ (альbedo $A1$, $A2$ и яркостные температуры $T3$, $T4$, $T5$) представлены в таблице 2.

Таблица 2. Характеристики измерений прибором AVHRR/NOAA для точек $L1$, $L2$ и $P0$

Точки	Характеристики измерений				
	$A1$, %	$A2$, %	$T3$, K	$T4$, K	$T5$, K
$L1$	8.38	8.80	293.03	259.25	256.89
	8.59	8.79	273.72	260.06	258.19
	1.35	1.20	4.51	3.27	3.16
$L2$	5.77	6.40	322.61	268.42	266.16
	5.78	6.09	276.91	266.80	264.84
	1.06	1.11	8.03	2.61	2.50
$P0$	3.02	3.84	281.34	280.00	278.98
	2.98	3.73	280.22	279.86	278.93
	0.11	0.09	0.46	0.15	0.14

Для каждой точки вторая строка – это среднее значение характеристики (для «окна» 9×9 пикселей) и третья строка – её СКО.

Анализ данных таблицы 2 совместно с [1–3] позволяет сделать вывод, что детектирование объекта $L2$ за счет высокого значения яркостной температуры $T_3 = 322\text{K}$ будет успешным для большинства используемых на практике спутниковых алгоритмов детектирования очагов пожаров. В то же время автоматическое обнаружение объекта $L1$ не может быть реализовано из-за достаточно низкого значения $T_3 = 293\text{K}$ и относительно высокой величины альbedo $A_1 = 8.38\%$ в канале 1 AVHRR.

Тематическая обработка представленного на рис.1 фрагмента спутникового изображения осуществлялась следующим образом.

1. Для задания параметров метеорологического состояния атмосферы были использованы ближайшие к точке $P0$ вертикальные профили температуры и влажности (рис.2), полученные на основе данных атмосферного зондировщика TOVS/NOAA.

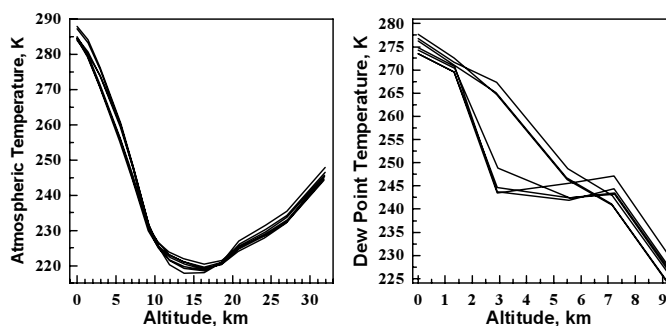


Рис. 2. Вертикальные профили метеорологических параметров атмосферы в окрестности высокотемпературных объектов $L1$ and $L2$

2. Оценка фоновой температуры подстилающей поверхности (ТПП) T_0 осуществлялась в точке $P0$ одноканальным (используя выражение 2) с использованием спутниковых метеорологических данных *TOVS/NOAA* и двухканальным способом [11] по инфракрасным измерениям 4-го и 5-го каналов *AVHRR*. В результате было получено значение $T_0 \approx 283$ К.

3. По измерениям *AVHRR*, используя модели атмосферного аэрозоля и облачности [12] совместно с методикой [9, 10], были определены оптические параметры атмосферы.

4. Выполнены оценки характеристик I_{BG} и P_3 , требуемых для восстановления яркостных характеристик ВТО и определены значения B_{HOT} (см. выражение 4) в точках $L1$ и $L2$ (табл. 3):

Таблица 3. Результаты восстановления интенсивности теплового излучения ВТО

Точки	I_3 интенсивность излучения объекта $мВт/(м^2 \text{ стер } см^{-1})$	τ_3^{aer} аэрозольная оптическая толщина	P_3 функция пропускания	I_{BG} интенсивность излучения фона $мВт/(м^2 \text{ стер } см^{-1})$	B_{HOT} интенсивность излучения объекта $мВт/(м^2 \text{ стер } см^{-1})$
L1	0,5032	2,64	0,0545	0,2602	4,4587 (355,5 К)
L2	1,6500	1,11	0,2511	0,2965	5,3903 (358,8 К)

Восстановленные значения B_{HOT} эквивалентны значениям радиационной температуры излучения, превышающим 355К (82°С), что позволяет уверенно подтвердить наличие высокотемпературных объектов как в точке $L2$, так и в точке $L1$.

Восстановленные значения B_{HOT} превышают уровень насыщения для канала 3 прибора *NOAA/AVHRR*. Поэтому для оценки точности восстановления B_{HOT} нами был проведен анализ спутниковых данных прибора *MODIS* (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), у которого порог насыщения для канала 21 ($\lambda = 3.96 \mu m$) превышает 400К. Анализ данных *MODIS* для условий высокой прозрачности показал, что измеряемые значения T_λ для объектов $L1$ and $L2$ близки между собой при близких оптических условиях наблюдения, а их величина может достигать 355-360 К. Эти данные позволяют сделать вывод о том, что восстановление B_{HOT} было осуществлено с хорошей точностью.

Заключение

Таким образом, несмотря на сложные оптико-геометрические условия наблюдений, за счет проведения атмосферной коррекции удается решить проблему автоматического обнаружения высокотемпературных объектов типа $L1$, если:

- оценить на основе наземных[и спутниковых данных реальную на момент проведения спутниковых измерений исходную информацию (оптико-метеорологические параметры атмосферы, значения фоновой ТПП);
- вычислить методами численного моделирования на основе исходной оптико-метеорологической информации требуемые характеристики (1) – (3);
- определить из выражения (4) интенсивность высокотемпературного объекта.

Литература

1. Спутниковый мониторинг лесных пожаров в России. Итоги. Проблемы. Перспективы = Satellite Monitoring of Forest Fires in Russia. Results. Problems. Perspectives // СО РАН. ИОА. ГПНТБ. Ред. В.В. Белов // Новосибирск, 2003. Сер. Экология. Вып. 70. 135 с.

2. *Kaufman Y.J., Justice C.O.* MODIS ATBD: Fire Products (Version 2.2, Nov. 10, 1998), EOS ID#2741, 1998. 77 p.
3. *Boles S.H., Verbyla D.L.* Comparison of three AVHRR-based fire detection algorithms for Interior Alaska // *Remote Sensing of Environment*, 2000. Vol.72. № 12. P.1–16.
4. *Афонин С.В.* Разработка и применение атмосферной радиационной модели для определения температуры поверхности океана по данным спутникового зондирования: Дис. ... канд. ф-м. н. // Томск, 1987. 192 с.
5. *Афонин С.В., Белов В.В., Макушкина И.Ю.* Моделирование рассеянного аэрозолем восходящего теплового излучения с учетом температурных неоднородностей на поверхности. Часть 3. Мелкомасштабные высокотемпературные аномалии // *Оптика атмосферы и океана*, 1997. Т. 10. № 2. С.184–190.
6. *Белов В.В., Афонин С.В., Гриднев Ю.В., Протасов К.Т.* Тематическая обработка и атмосферная коррекция аэрокосмических изображений // *Оптика атмосферы и океана*. 1999. Т. 12. № 10. С. 991–1000.
7. *Belov V.V., Afonin S.V.* Distorting effect of the atmosphere in satellite monitoring of small-sized high-temperature anomalies. // *Proceedings of International Conference on Algorithms and Technologies for Multispectral, Hyperspectral, and Ultraspectral Imagery VIII (AeroSense 2002)*. Orlando, USA, 2002. Proc. SPIE. Vol. 4725. P. 471–478.
8. *Белов В.В., Афонин С.В.* Роль атмосферной коррекции в задаче космомониторинга малоразмерных (subpixel) высокотемпературных объектов на подстилающей поверхности // *Международный симпозиум стран СНГ по атмосферной радиации "МСАР-2"*. СПб., 2002. С. 96–97.
9. *Афонин С.В., Белов В.В.* Информационно-методические основы построения эффективных систем спутникового мониторинга лесных пожаров // *Вычисл. технологии*. 2003. Т. 8, спец. вып. С. 35–46.
10. *Афонин С.В., Белов В.В., Белан Б.Д., Панченко М.В., Сакерин С.М., Кабанов Д.М.* Сравнение спутниковых (AVHRR/NOAA) и наземных измерений характеристик атмосферного аэрозоля // *Оптика атмосферы и океана*, 2002. Т.15. № 12. с. 1118–1123.
11. *Price, J. C.* Land surface temperature measurements from the split window channels of the NOAA 7 Advanced Very High Resolution Radiometer // *Journal of Geophysical Research*, 1984. 89, 7231- 7237.
12. *Kneizys F. X., Shettle E. P., Anderson G. P., Abreu L. W., Chetwynd J. H., Selby J. E. A., Clough S. A., Gallery W. O.* User Guide to LOWTRAN-7, ARGL-TR-86-0177. ERP № 1010 // Hansom AFB, MA 01731.