

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ, ГИДРОСФЕРЫ
И ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

УДК 551.46, 551.52, 553.361

С.В. Афонин

**К вопросу об атмосферной коррекции спутниковых данных
в задаче мониторинга из космоса
малоразмерных очагов лесных пожаров**

Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск

Поступила в редакцию 28.01.2005 г.

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 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 (МПР) порядка 1 км^2 . В этом случае требуется применение надежных алгоритмов автоматического распознавания на спутниковых ИК-изображениях малоразмерных высокотемпературных аномалий площадью менее 0,1% от МПР. 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 данных об алгоритмах детектирования очагов пожаров из космоса (см., например, [1–3]) позволяет сделать следующий вывод. В большинстве применяемых на практике алгоритмов 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 альбедо и яркостных температур (или их функциями). Значения порога dP устанавливаются фиксированными или могут быть определены на основе статистических характеристик, вычисленных для $\{x\}$ в окре-

стности 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 статье 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.

**1. 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 ($T_f = 600 \div 1200 \text{ К}$).

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

$$I_{hot} = B_{hot}P_\lambda, B_{hot} = R(\theta)\epsilon_\lambda^f B_\lambda(T_f), R(\theta) = S_f/S_0(\theta),$$

где $P_\lambda = \exp\{-\tau_\lambda/\cos(\theta)\}$ — пропускание атмосферы; τ_λ — оптическая толщина атмосферы; θ — угол сканирования оси прибора; $\epsilon_\lambda^f \approx 1$ — 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

$$I_{srf} = [1 - R(\theta)]\epsilon_\lambda^0 B_\lambda(T_0)P_\lambda, \quad (3)$$

где ϵ_λ^0 — излучательная способность ПП; T_0 — фоновая температура ПП;

$$I_{atm} = f\{\theta, T(h), \tau_\lambda(h)\} \quad (4)$$

зависит от вертикальных профилей температуры и характеристик ослабления атмосферы;

$$I_{rfl} = A_\lambda P_\lambda f_\lambda^{rfl}(Z, met, ext, sct), \quad (5)$$

где A_λ — альbedo ПП;

$$I_{sct} = f_\lambda^{sct}(\theta, \varphi, Z, met, ext, sct). \quad (6)$$

В выражениях (2) — (6) использованы обозначения:

— геометрических параметров наблюдений (θ, φ, Z): угла наклона оси прибора, зенитного угла Солнца, относительного азимута измерений;

— характеристик атмосферы: метеорологических (met), ослабления теплового излучения (ext) и рассеяния теплового излучения (sct).

С точки зрения корректного учета оптико-геометрических условий наблюдений задачу обнаружения из космоса малоразмерного высокотемпературного объекта следует решать путем восстановления в 3-м канале AVHRR ($\lambda = 3,75$ мкм) интенсивности B_{hot} излучения малоразмерного теплового источника:

$$B_{hot} = (I_3 - I_{bg})/P_3, \quad (7)$$

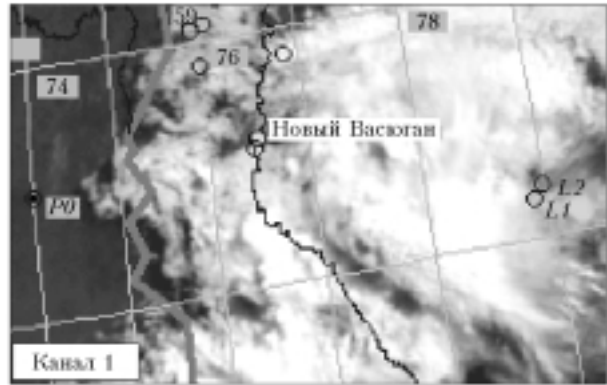
где I_3 — измеряемая интенсивность теплового излучения, а величины I_{bg} и P_3 вычисляются на основе априорной оптико-метеорологической информации.

В этом случае решающее правило обнаружения очага лесного пожара из космоса $B_{hot} > dB$ будет не зависимым от оптико-геометрических условий

наблюдений. Для достижения этой цели необходима информация о характеристиках подстилающей поверхности, об оптических и метеорологических параметрах атмосферы.

2. Пример атмосферной коррекции спутниковых данных в задаче обнаружения малоразмерных высокотемпературных объектов из космоса

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



Фрагмент спутникового изображения двух высокотемпературных объектов $L1$ и $L2$, $P0$ — точка характеризуется безоблачной ситуацией; спутник NOAA-14; спектральные каналы AVHRR — 0,63 (№ 1) и 3,75 мкм (№ 3)

На фрагменте (канал 3) хорошо наблюдаются два стационарных высокотемпературных объекта (точки $L1$ и $L2$). Наблюдение ВТО из космоса характеризуется достаточно сложными оптическими условиями, так как в окрестностях точек $L1$ и $L2$ присутствует неоднородная полупрозрачная облач-

ность. При этом из визуальных данных следует отметить более высокую оптическую плотность облачности именно вокруг точки $L1$.

На изображении выделена точка $P0$, которая характеризуется безоблачными условиями спутниковых измерений. Полученные в ее 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 A_1 , A_2 и яркостные температуры T_3 , T_4 , T_5) представлены в табл. 1.

Таблица 1
Характеристики измерений прибором AVHRR/NOAA для точек $L1$, $L2$ и $P0$

Точки	Характеристики измерений				
	A_1 , %	A_2 , %	T_3 , К	T_4 , К	T_5 , К
$L1$	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

Примечание. Для каждой точки вторая строка — это среднее значение величины (для «окна» 9×9 пикселей) и третья строка — ее СКО.

Анализ данных табл. 1 совместно с [1–3] позволяет сделать вывод, что успешное детектирование объекта $L2$ за счет высокого значения яркостной температуры $T_3 = 322$ К не будет представлять сложностей для большинства используемых на практике алгоритмов детектирования очагов пожаров. В то же время автоматическое обнаружение объекта $L1$ не может быть реализовано из-за относительно низкого значения $T_3 = 293$ К и относительно высокой величины альbedo $A_1 = 8,38\%$ в канале 1 AVHRR.

Тематическая обработка представленного на рисунке фрагмента спутникового изображения осуществлялась следующим образом.

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

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

3. По измерениям AVHRR с помощью моделей 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. (7)] в точках $L1$ и $L2$ (табл. 2).

Таблица 2
Результаты восстановления интенсивности теплового излучения ВТО

Точки	I_3 , $\frac{\text{МВт}}{\text{м}^2 \cdot \text{ср} \cdot \text{см}^{-1}}$	τ_3^{aer}	P_3	I_{bg} , $\frac{\text{МВт}}{\text{м}^2 \cdot \text{ср} \cdot \text{см}^{-1}}$	B_{hot} , $\frac{\text{МВт}}{\text{м}^2 \cdot \text{ср} \cdot \text{см}^{-1}}$
$L1$	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 355 К (82 °С), что позволяет уверенно подтвердить наличие высокотемпературных объектов как в точке $L2$, так и в точке $L1$.

Заключение

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

- оценить на основе наземной и спутниковой информации 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)–(6);
- определить из выражения (7) интенсивность высокотемпературного объекта.

Автор выражает искреннюю признательность д.ф.-м.н. В.В. Белову за полезные дискуссии при выполнении этой работы и обсуждение ее результатов.

1. *Спутниковый мониторинг лесных пожаров в России. Итоги. Проблемы. Перспективы* / Ред. В.В. Белов // Satellite Monitoring of Forest Fires in Russia. Results. Problems. Perspectives. СО РАН. ИОА. ГИИТБ. Новосибирск, 2003. 135 с. (Сер. Экол. Вып. 70).
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 Environ. 2000. V. 72. N 1. 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., Макушикина И.Ю. Моделирование рассеянного аэрозодем восходящего теплового излучения с учетом температурных неоднородностей на поверхности. Часть 3. Мелкомасштабные высокотемпературные аномалии // Оптика атмосф. 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 атмосф. 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 // Proc. SPIE. 2002. V. 4725. P. 471–478.
8. *Белов В.В., Афонин С.В.* Роль атмосферной коррекции в задаче космомониторинга малоразмерных (subpixel) высокотемпературных объектов на подстилающей поверхности // Междунар. симп. стран СНГ по атмосф. 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. Спец. вып. // Вычисл. технол. 2003. Т. 8. 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 атмосф. 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 // J. Geophys. Res. 1984. V. 89. P. 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.

S.V. Afonin. Toward the problem of atmospheric correction of satellite data in the space monitoring of small-sized forest fires.

The NOAA satellite measurements have been used to reconstruct the brightness characteristics of two small-sized stationary high-temperature objects (hot spots), located in the Tomsk Region, with the use of the real-time information about the optical, meteorological, and geometric conditions of satellite observations.