

УДК 551.501:629.195.1

**КОСМИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ СТАЦИОНАРНЫХ  
ТЕМПЕРАТУРНЫХ АНОМАЛИЙ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ  
СПУТНИКА «TERRA/AQUA-MODIS»**

Доктор техн. наук	А.Ф. Мухамедгалиев
Канд. геогр. наук	А.Х. Ахмеджанов
Канд. техн. наук	Б.Э. Бекмухамедов
	Т.К. Караданов
	А.А. Мухамедгалиев

*В данной работе рассматривается вопрос об использовании измеряемых на сканере MODIS спутника TERRA параметров отраженного сигнала в диапазоне тепловых каналов для определения стационарных температурных аномалий.*

Современные методы спутникового мониторинга загрязнения атмосферы представляются перспективными для включения их в общую систему национального и международного контроля. Сенсоры нового поколения спутников представляют большие потенциальные возможности для решения этой задачи. Разрешение тепловых каналов сканера MODIS 1000 м, поэтому в результате космического экологического мониторинга может вестись региональный контроль состояния воздушной среды с выявлением участков, где могут находиться источники выбросов загрязняющих веществ. На соответствующих участках могут происходить либо пожары, либо находиться факельные установки. На больших территориях часто бывают лесные или степные пожары. Они характеризуютсядвигающимся по направлению ветра огненным фронтом, т.е. двигающимся очагом. На предприятиях нефтегазового комплекса до настоящего времени продолжают сжигать попутный газ на факельных установках. Характерными загрязняющими веществами при этих процессах являются: углеводороды, природный газ, оксид и диоксид углерода, сернистые соединения, окислы азота, фенолы, меркаптаны и т. д. Преобладающим компонентом (от 85 до 99 %) всех природных горючих газов является метан ( $CH_4$ ). По содержанию более тяжелых углеводородов попутные газы условно разделяются на

сухие (или «тощие») – менее  $150 \text{ г/м}^3$ , средние – от 150 до  $300 \text{ г/м}^3$  и жирные (или богатые) – более  $300 \text{ г/м}^3$ .

По проблеме обнаружения пожаров по снимкам MODIS в инфракрасных каналах: 3,660...3,840 мкм (20-ый канал), 3,929...3,989 мкм (22-ой канал), 4,020...4,080 мкм (23-ий канал), 4,433...4,498 мкм (24-ый канал) и 4,482...4,549 мкм (25-ый канал) имеются большие наработки [1-8]. В работе [2] предпринята первая попытка определения объемов сжигаемого попутного газа: описана однопараметрическая модель и соответствующее программное обеспечение для определения расходов природного газа на факелах по данным MODIS, поступающих в Югорский НИИ информационных технологий (Россия). Для определения количественных характеристик газовых факелов могут быть использованы данные спутниковой информации, прием которых осуществляется в АО «КАЗГЕОКОСМОС». Система MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer – сканирующий спектрорадиометр среднего разрешения) предназначена для сбора данных о поверхности Земли как единой системы. Данные MODIS по всей поверхности Земли поступают со спутника Terra 6 раз в сутки в 36 спектральных зонах (в диапазоне 0,405...14,385 мкм) с разрешением 250, 500, 1000 м, что обеспечивает моделирование в глобальном и региональном масштабе. Материалы съемки MODIS имеют широкий спектр применения для исследования атмосферы, океана и суши. MODIS состоит из двух сканирующих спектрометров, один из которых (MODIS-N) снимает в надир, а ось съемки другого (MODIS-T) может быть отклонена. 36 спектральных зон MODIS охватывают диапазон с длинами волн от 0,4 до 14,4 мкм. В двух зонах (620...670 и 841...876 нм) съемка ведется с разрешением 250 м, в пяти зонах видимого и ближнего инфракрасного диапазона с разрешением 500 м, а в остальных (диапазон от 0,4 до 14,4 мкм) - 1000 м. Сканер MODIS имеет приемлемое разрешение, размер пикселя в тепловых каналах примерно  $1 \text{ км} \times 1 \text{ км}$  при наблюдении в надир с некоторым увеличением при увеличении угла сканирования. Как показано в [2], газовые факелы в безоблачных условиях подсвечивают в тепловых каналах от 1 до 3 пикселей.

В данной работе предлагается максимально использовать цифровую спутниковую информацию, поступающую на приемную станцию. Космический снимок для 21 теплового канала (длина волны  $\lambda = 3,929...3,989 \text{ мкм}$ ) представляется в виде численной матрицы, соответствующей величине интенсивности фиксируемого излучения, называемой

радианс (Вт/(м<sup>2</sup> мкм ср)). Основной задачей является определение температуры земной поверхности  $T_{z,i,j}$  по данным космического зондирования.

Интенсивность восходящего монохроматического излучения  $I_{\lambda,i,j}^{\uparrow}(m)$  в излучающей атмосфере для каждого пикселя с координатами  $i,j$  описывается следующим уравнением:

$$I_{\lambda,i,j}^{\uparrow}(m) = B_{\lambda}(T_{z,i,j})P_{\lambda\vartheta}(m) + B_{\lambda a}, \quad (1)$$

где  $B_{\lambda,i,j}(T_z)$  – функция Планка,  $m = \int_0^z \rho_n dz$  – количество поглощающе-

го вещества в столбе воздуха единичного сечения от земной поверхности

до уровня  $z$ ,  $P_{\lambda\vartheta}(m) = e^{-\frac{a_{\lambda 0} m}{\cos \vartheta}}$  – функция пропускания излучения в атмосфере,  $a_{\lambda 0}$  – постоянный параметр,  $\vartheta$  – угол зондирования,  $B_{\lambda a}$  – излучение, поступающее на приборы ИСЗ из атмосферы.

Восходящее излучение ослабевает за счет функции пропускания в результате поглощения в атмосфере, а на сенсор спутника, кроме ослабленного восходящего излучения, попадает излучение атмосферы. Пренебрегая излучением атмосферы и поглощением восходящего излучения, температура земной поверхности в первом приближении может быть определена согласно функции Планка.

Поскольку пиксель отражает осредненную температуру квадрата с площадью 1 км на 1 км, то источник должен быть достаточно мощным, чтобы выделить этот пиксель из окружающих по интенсивности излучения (радиансу [Вт/(м<sup>2</sup> мкм ср)]).

Излучение черного тела описывается формулой Планка для этой длины волны:

$$B_{\lambda,i,j}(T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda k T_{i,j}}} - 1}, \quad (2)$$

где  $i,j$  – индексы пикселей в матрице,  $h$  – постоянная Планка,  $c$  – скорость света,  $k$  – постоянная Больцмана,  $T$  – температура.

Из этого выражения можно определить значение радиационной температуры:

$$T_{i,j} = \frac{hc}{\lambda k} \frac{1}{\ln\left(1 + \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 B_{\lambda,i,j}(T)}\right)}. \quad (3)$$

По этим значениям можно построить температурное поле, где локальным максимумам будут соответствовать тепловые источники, выделенные пороговой температурой. Пороговая температура может быть определена как разница температуры локального максимума по 21 каналу и температуры в этой точке по данным 31 канала сенсора MODIS. Температурное поле по 31 каналу является сильно сглаженным, на нем нет тех локальных максимумов, которые наблюдаются на 21 канале. Поэтому по данным 31 канала можно определить фоновое тепловое поле на этот момент времени. Также фоновое температурное поле можно вычислить по значениям температуры окружающих этот максимум пикселей. По рассчитанным значениям температуры для каждого пикселя было построено изображение (рис.1) с помощью программного пакета «ENVI». На инфракрасном изображении земной поверхности выделяются локальные максимумы.

Если предположить, что выявленный локальный температурный максимум выделен на территории добычи нефти, процесс которой сопровождается сжиганием попутного газа, то можно вычислить, сколько потребуется сжечь попутного газа для получения такого количества тепла. Поскольку факел излучает во всем тепловом диапазоне спектра солнечной радиации, то, чтобы получить количество теплоты, нужно определить интегральное значение теплового излучения  $F_{i,j}$ . Это значение можно вычислить по закону Стефана-Больцмана:

$$F_{i,j} = \sigma T_{i,j}^4, \quad (4)$$

где  $\sigma$  – постоянная Стефана-Больцмана. Из интегрального значения теплового излучения в телесный угол в 1стерадиан  $F_{i,j}$  можно определить общее значение теплоты  $Q_{i,j}$  :

$$Q_{i,j} = 2 \pi F_{i,j} S, \quad N_{i,j} = Q_{i,j} / t, \quad (5)$$

где  $2 \pi$  – половина всего полного телесного угла,  $S$  – площадь пикселя,  $t$  – время работы источника. Для действующей факельной установки сжигания попутного газа по интегральному значению теплового потока можно вычислить ориентировочные объемы сжигаемого природного газа с учетом коэффициента сгорания попутного нефтяного газа  $k_c$ , который в среднем равен 33500 кДж/м<sup>3</sup> [2].

$$V = Q_{i,j} / k_c \quad (6)$$

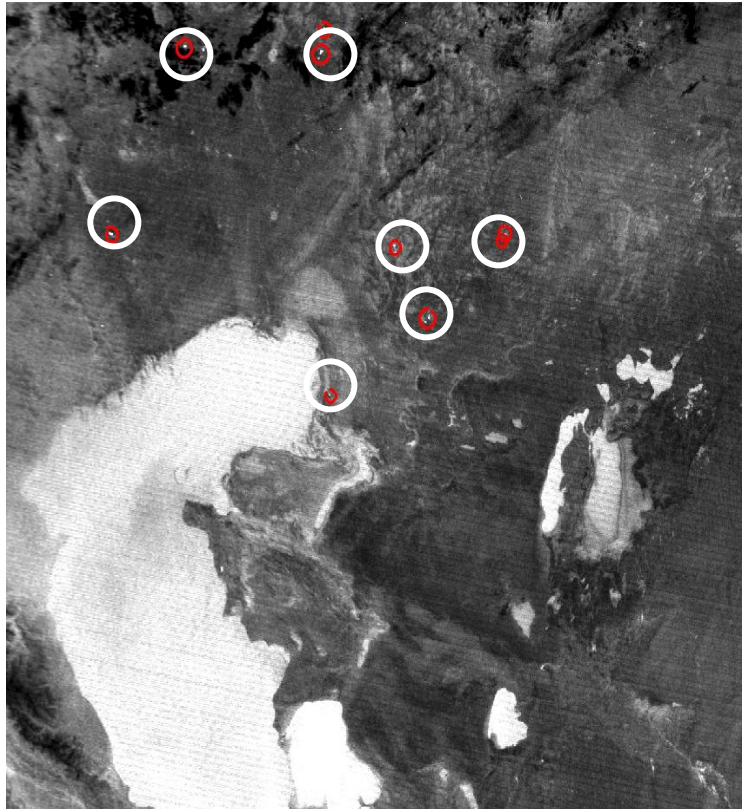
В качестве примера было использовано ночной космический снимок «TERRA/AQUA-MODIS» за 01.08.2006 г. (рис.1). На базе данных радианса, соответствующей этому изображению, было рассчитано темпера-

турное поле. С пороговой температурой 305 °K были выделены локальные максимумы. Из всех рассчитанных точек были выделены 13 пикселей с координатами в системе UTM, которые попадают в районы добычи нефти. На рис.1 выделены 7 локальных максимумов, т.к. остальные из-за территориальной близости сливаются в одну точку. Для детального анализа необходимо использовать космические снимки более высокого разрешения. В этих точках были определены значения температуры, интенсивности электромагнитного излучения, выделяемое тепло по всему тепловому спектру и количество попутного газа, которое нужно было бы сжечь, чтобы получить такое количество тепла (табл.1). Из 13 выделенных пикселей соседние пиксели были 4 группы и 1 одиночный источник. Были рассчитаны общие для этих групп выделяемое тепло и соответствующие этому теплу объемы сжигаемого попутного газа (табл.2). Распределения интенсивности излучения и температуры в точке локального температурного максимума на северо-восточном побережье Каспийского моря показаны на рис.2 и 3. Некоторое увеличение значения радианса и температуры в точке локального максимума наблюдается в августе 2006 г.

Таблица 1

Перечень температурных максимумов за летний период 2006 г.

Номер	Температура, °K	Излучение, вт/(м <sup>2</sup> мкм ср)	Тепло(дж) × 10 <sup>13</sup>	Сжиг. газ, (м <sup>3</sup> /сут) × 10 <sup>5</sup>
1	305	100,6	0,2274	0,6788
2	304	94,1	0,2129	0,6355
3	318	189,7	0,4289	1,280
4	315	168,2	0,3802	1,135
5	303	87,83	0,1986	0,5928
6	338	349,9	0,7911	2,362
7	335	324,0	0,7325	2,187
8	312	147,2	0,3328	0,9933
9	329	274,2	0,6199	1,851
10	321	211,9	0,4791	1,430
11	325	242,5	0,5482	1,636
12	334	315,5	0,7133	2,129
13	323	227,1	0,5133	1,532



*Рис.1 Космический снимок «TERRA/AQUA-MODIS» за 01.08.2006 г.*

Основная технологическая цепочка определения температурных максимумов, представленная в данной работе состоит:

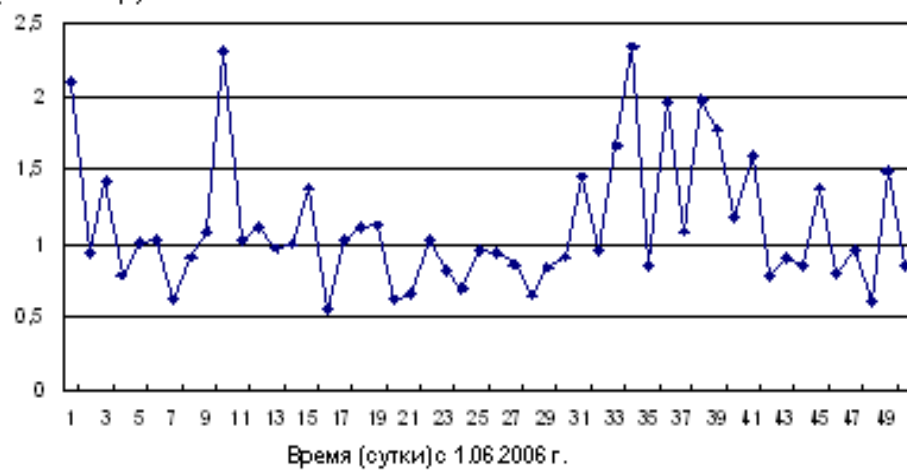
- В определении температурного поля по формуле Планка по двум каналам (21,31) ИСЗ «TERRA/AQUA-MODIS»;
- В выделении локальных максимумов по пороговому значению;
- В проведении расчетов общего электромагнитного излучения по всему спектру;
- В расчете соответствующего общего теплового потока по всему тепловому спектру;
- В расчете предположительного объема попутного сжигаемого газа, которое необходимо, чтобы получить расчетное количество теплового потока.

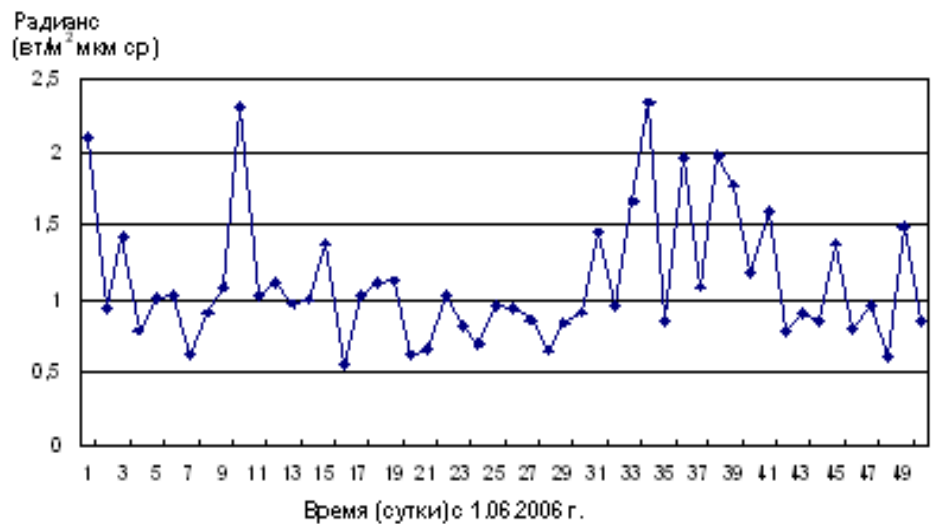
Таблица 2

Список групп (1-4) и одиночный(5) источник сжигания попутного газа за летний период 2006 г.

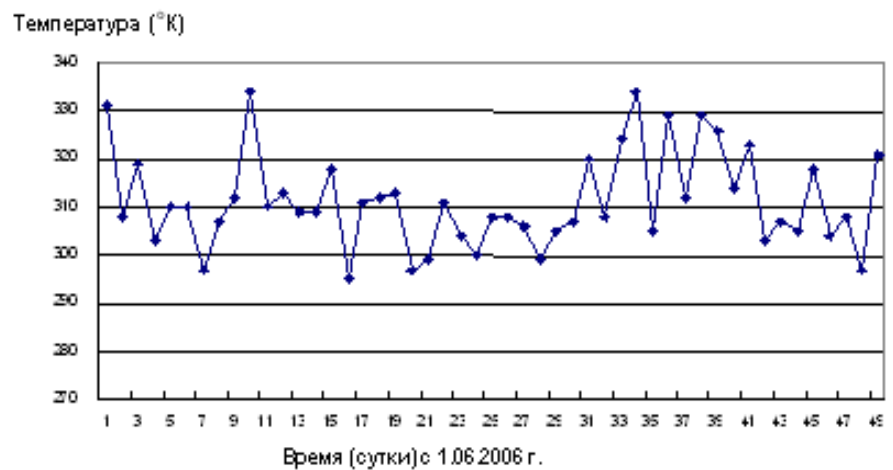
Номер	Общее тепло(дж) $\times 10^{13}$	Объем сжиг. газа (м <sup>3</sup> /сут) $\times 10^6$
1	0,4403	0,131429
2	0,8091	0,241521
3	1,524	0,454813
4	3,207	0,957210
5	0,1986	0,592753

Радиянс  
(Вт/м<sup>2</sup> мкм ср)





*Рис.2. График распределения спектральной яркости за летние месяцы в точке температурной аномалии на северо-восточной части побережья Каспийского моря.*



*Рис.3. График распределения температуры °K, вычисленный по данным рис.2.*

Представленная в данной работе технология может быть использована при ведении космического мониторинга загрязнения атмосферы на базе спутниковых данных для получения количественной оценки мощно-



сти и расхода попутного газа на факелах. Независимый набор калибровочных данных по параметрам факельных установок необходимо выполнить в подспутниковом эксперименте.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абушенко Н.А., Барталев С.А., Беляев А.И., Ершов В.В., Коровин Г.Н., Кошелев В.В., Лупян Е.А., Крашенинникова Ю.С., Мазуров А.А., Минько Н.П., Назиров Р.Р., Прошин А.А., Флитман Е.В. Система сбора, обработки и доставки спутниковых данных для решения оперативных задач службы пожароохраны лесов России// Научно-технические технологии.– 2000. – т. 1. – N 2. – С 4-18.
2. Алсынбаев К.С., Суляев Я.С., Сиваков М.П., Захаров В.И., Грибанов К.Г. Система космического мониторинга факельных установок с целью оценки объемов сжигания попутного нефтяного газа: Материалы Второй открытой Всероссийской конференции / "Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса." – Москва.: 2004.
3. Афонин С.В., Белов В.В., Гриднев Ю.В. Система космомониторинга лесных пожаров на территории Томской области.// Оптика атмосферы и океана 2000. – Т.13. – N11. –С.996-1004.
4. Беляев А.И., Ершов В.В., Коровин Г.Н., Лупян Е.А., Мазуров А.А., Назиров Р.Р., Прошин А.А., Флитман Е.В. Современные возможности Российской системы оперативного спутникового мониторинга лесных пожаров: Доклады III Всероссийской конференции / "Аэрокосмические методы и геоинформационные технологии в лесоведении и лесном хозяйстве". – Москва.: – 2002. – С. 34-36.
5. Коровин Г.Н., Андреев Н.А. Авиационная охрана лесов. – М.: Агропромиздат, 1988, – 220 с.
6. Сухинин А.И. Система космического мониторинга лесных пожаров в Красноярском крае // Сибирский экологический журнал.– 1996.– Т.3. – № 1. – С. 85-91.
7. Justice C. O., Giglio L., Korontzi S., Owens J., Morisette J. T., Roy, D., Descloitres J., Alleaume S., Petitcolin F., and Kaufman Y. The MODIS Fire Products // Remote Sensing of Environment, – 2002.– V.83(1-2). –P. 244-262.
8. Casanova J.-L., Calle A., Romo A., Sanz J. Forest fire detection and monitoring by means of an integrated MODIS-MSG system. Remote Sensing Laboratory of University of Valladolid (LATUV): Материалы / Вторая открытая Всероссийская конференция "Современные

проблемы дистанционного зондирования земли из космоса" –  
Москва: 2004. – С. 235.

АО «КАЗГЕОКОСМОС»

**«TERRA/AQUA-MODIS» ЖЕР СЕРІГІ МӘЛІМЕТТЕРІ НЕГІЗІНДЕ  
СТАЦИОНАРЛЫ ТЕМПЕРАТУРА АУЫТҚУЛАРЫНЫҢ  
КОСМОСТЫҚ МОНИТОРИНГІ**

Техн. ғылым. докторы	А.Ф. Мухамедгалиев
Геогр. ғылым. канд.	А.Х. Ахмеджанов
Техн. ғылым. канд.	Б.Э. Бекмухамедов
	Т.К. Караданов
	А.А. Мухамедгалиев

*Берілген жұмыста TERRA жер серігінің MODIS сканерінде жылу каналы диапазонында шағылысқан сигнал параметрлерінің өлшемдері стационарлы температуралық ауытқуды анықтау үшін қолдануы қарастырылады.*