

ОПТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И БАЗЫ ДАННЫХ ОПТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ
ОБ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ

УДК 551.554.7

К.Г. Грибанов¹, В.И. Захаров¹, К.С. Алсынбаев², Я.С. Суляев²

**Метод определения расхода попутного газа на факелах
по данным спутникового зондирования сенсорами
типа MODIS в ИК-каналах**

¹Уральский государственный университет, г. Екатеринбург

²Югорский НИИ информационных технологий, г. Ханты-Мансийск

Поступила в редакцию 12.03.2006 г.

Предложена линейная, однопараметрическая модель для количественной оценки расхода попутного газа на факелах по данным зондирования из космоса сенсорами типа MODIS в микроокне прозрачности атмосферы 3,66–3,84 мкм. В данной модели расход газа пропорционален разности яркости засветки пикселя, накрывающего факел, и соседних фоновых пикселей. Численное значение параметра определяется путем сопоставления результатов синхронизированных по времени непосредственных замеров расхода газа на факеле и данных сенсора по разности яркости засветки этих пикселей. Предложенная модель реализована в оригинальном программном пакете MODIS_Flares, откалибрована и апробирована для одного из факелов Ханты-Мансийского АО (в районе 61,8° с.ш., 77,2° в.д.) на основе результатов зондирования сенсором MODIS со спутника Terra.

Введение

В связи с ратификацией Россией Киотского протокола и вступлением его в силу с февраля 2005 г. проблема независимого количественного контроля как природной эмиссии, так и промышленных выбросов парниковых газов в атмосферу каждым отдельным регионом становится актуальной. Разрабатываемые современные средства и методология термического зондирования Земли из космоса [1–3] и спутникового мониторинга парниковых газов представляются перспективными для включения их в общую систему национального и международного контроля эмиссии парниковых газов в атмосферу. Создаваемые в рамках международных программ и запускаемые на полярные орбиты такие спутниковые сенсоры, как MODIS [4], GLI [5], AIRS [6] и др., представляют значительные потенциальные возможности для решения этой задачи.

Нами предпринята первая попытка разработки простой однопараметрической модели и соответствующего программного обеспечения (ПО) для определения расходов природного газа на факелах из данных MODIS, принимаемых в реальном режиме времени со спутника Terra в Югорском НИИ информационных технологий. Основанием для привлечения данных MODIS к решению этой задачи послужили уже имеющиеся в литературе наработки по проблеме обнаружения пожаров и тепловых аномалий в районах расположения газовых факелов по снимкам MODIS [7–9] с использованием инфракрасных каналов, 3,66–3,84 мкм (20-й канал), 3,929–3,989 (22-й), 4,02–4,08 (23-й), 4,433–4,498 (24-й) и 4,482–

4,549 мкм (25-й канал) окон прозрачности атмосферы. Однако попыток получения количественных характеристик расхода газа на факеле из этих данных ранее не предпринималось.

Сенсор MODIS имеет также приемлемое для такого рода задач пространственное разрешение в ИК-каналах, размер пикселя 1×1 км при наблюдении в надир, с соответственным ростом при увеличении угла сканирования. Имеющиеся данные по наблюдению газовых факелов (в безоблачных условиях) показывают, что факел и его тепловая шлейф подсвечивают в перечисленных каналах от 1 до 3 пикселей. Причем спектральная яркость этих пикселей может быть в несколько раз выше, чем спектральная яркость фоновых пикселей вокруг факельного шлейфа. Анализ температурных весовых функций 20, 22, 23 и 25-го каналов сенсора MODIS был проведен с помощью программного пакета FIRE-ARMS [10].

Максимумы температурных весовых функций, характеризующих чувствительность наблюдаемого сенсором сигнала в канале к вариациям температуры атмосферы на разных высотах, локализуются следующим образом: 20-й канал – на поверхности, 22-й и 23-й каналы – основной максимум на поверхности и слабые максимумы пробегают высоты примерно 1–4 км, 25-й канал – максимумы пробегают высоты примерно 1–7 км, на поверхности максимумов нет. Это означает, что 20-й канал хорошо видит излучение факела непосредственно с поверхности, 22-й и 23-й каналы принимают излучение факела в основном с поверхности с малой примесью излучения от нижних слоев атмосферы, а 25-й канал принимает излучение факела главным образом с нижней тропосферы.

То есть, наблюдая за факелом и сравнивая данные 20, 23 и 25-го каналов, в принципе возможно увидеть конфигурацию срезов атмосферного столба, содержащего факельный шлейф в разных слоях тропосферы, и оценить размеры последнего.

Для определения среднего расхода газа на факеле за время, которое много больше характерного времени турбулентного переноса продуктов горения вдоль и поперек факельного шлейфа, перспективным представляется одновременное использование данных 20, 23 и 25-го каналов сенсора MODIS. Если же ставить задачу определения мгновенного расхода газа на факеле на момент измерения со спутника, то достаточно использовать только данные 20-го канала. На рис. 1 представлен пример распределения яркости в 20-м канале MODIS для фрагмента поверхности, где расположен один из факелов высокого давления Вань-Еганского месторождения с расходом газа около 100 тыс. м³/ч. Разность яркости засветки пикселя, накрывающего факел, и соседних фоновых пикселей можно интерпретировать как объем выступа на графике.

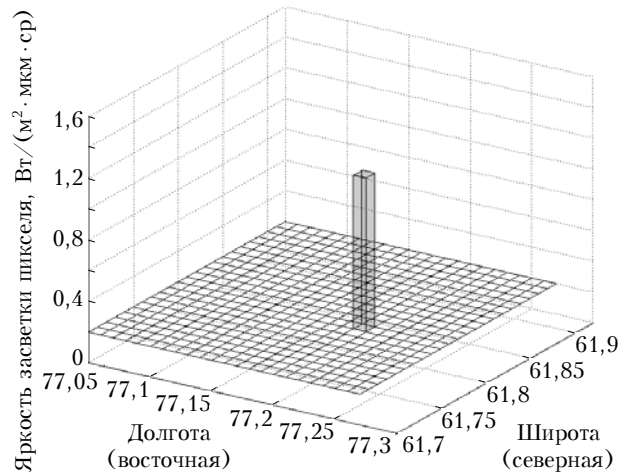


Рис. 1. Характерный пример сравнительной яркости засветки пикселя MODIS, накрывающего факел высокого давления, и соседних пикселей при зондировании местности Вань-Еганского месторождения данным сенсором со спутника Terra

Далее представлены однопараметрическая модель для определения мгновенного расхода попутного природного газа на факеле по данным 20-го канала сенсора MODIS, пример ее калибровки по результатам замеров среднечасовых расходов газа на факеле и программная реализация модели ПО MODIS_Flares.

Модель

Предлагаемый метод представляет собой модель начального уровня, которая может быть в дальнейшем усложнена для получения более точных результатов по определению расхода сжигаемого попутного газа из данных спутникового зондирования. Дальнейшее усложнение модели может быть связано как с более подробным учетом физики горения газа, так и с уточнением оптической модели пассив-

ного зондирования, в том числе учитывающей метеопараметры и фактическую геометрию пламени.

Основные упрощающие предположения следующие:

- интенсивность света, излучаемого факелом в спектральном интервале 3,66–3,84 мкм (20-й канал MODIS) в направлении спутника, слабо зависит от угла наблюдения;

- атмосфера является безоблачной, облачные ситуации отбрасываются как непригодные для определения расхода сжигаемого попутного газа;

- безоблачная атмосфера в спектральном интервале 3,66–3,84 мкм является либо достаточно прозрачной (слабоаэрозольной), либо имеет постоянное пропускание, слабо зависящее от метеоусловий;

- тепловыделение в факеле зависит только от расхода сжигаемого газа и его удельной теплоты сгорания, предполагается, что относительная часть негоревшего газа мала;

- для определения расхода газа используется только собственное излучение пламени факела, излучение продуктов горения в процессе их турбулентного переноса в атмосфере не учитывается.

Спектральную плотность потока излучения, приходящего на детектор MODIS от поверхности Земли, можно представить следующим образом [11]:

$$P_\lambda = R_\lambda \frac{S_{\text{pix}} \cos \theta S_d}{r^2}, \quad (1)$$

где R_λ – спектральная плотность (Вт/мкм) энергетической яркости пучка излучения, приходящего с поверхности пикселя MODIS площадью S_{pix} ; θ – зенитный угол спутника; S_d – площадь детектора; r – расстояние от спутника до центра пикселя MODIS на поверхности. Для простоты изложения предполагается, что зенитный угол постоянен внутри одного пикселя. В случае наличия внутри пикселя MODIS горящего факела с учетом модельных предположений можно записать следующее выражение для потока излучения, приходящего на детектор:

$$P_\lambda = P_\lambda^0 + CQF_\lambda \frac{S_d}{4\pi r^2}, \quad (2)$$

где P_λ^0 – поток излучения от поверхности, определяемый выражением (1); Q – расход подаваемого газа, тыс. м³/г; F_λ – плотность распределения энергии излучения факела по спектру, мкм⁻¹, удовлетворяющая условию нормировки

$$\int_0^\infty F_\lambda d\lambda = \eta,$$

где η – КПД преобразования энергии горения в излучение факела. Подставляя выражение (1) в (2) и сокращая общие множители, можно получить равенство

$$R_\lambda S_{\text{pix}} \cos \theta = R_\lambda^0 S_{\text{pix}} \cos \theta + CQ \frac{F_\lambda}{4\pi}, \quad (3)$$

из которого следует выражение для определения расхода газа:

$$Q = \frac{4\pi(R_\lambda - R_\lambda^0)S_{\text{pix}} \cos\theta}{CF_\lambda}. \quad (4)$$

Величину F_λ можно определить экспериментально, измеряя спектры факелов, а также используя в качестве подгоночного модельный параметр, при необходимости ее можно определять для каждого конкретного факела отдельно. Определение фоновой величины R_λ^0 проводилось по данным яркости пикселей MODIS в окрестности факела.

Калибровка модели

Для оценки возможности определения расхода попутного газа в факеле были отобраны измерения MODIS, выполненные в течение августа 2004 г. над факелом высокого давления в условиях безоблачной атмосферы (всего 14 измерений). Использовались измерения над факелом Вань-Еганского месторождения (в районе 61,8° с.ш., 77,2° в.д.). При этом для всех отобранных измерений MODIS был известен среднечасовой расход газа на этом факеле [12]. На рис. 2 представлена калибровочная зависимость расхода газа от

$$\xi = (R_\lambda - \langle R_\lambda^0 \rangle) S_{\text{pix}},$$

где R_λ — яркость излучения в 20-м канале MODIS, приходящего с пикселя, накрывающего факел; $\langle R_\lambda^0 \rangle$ — среднее значение фоновой яркости (в этом же канале) пикселей прилегающей поверхности.

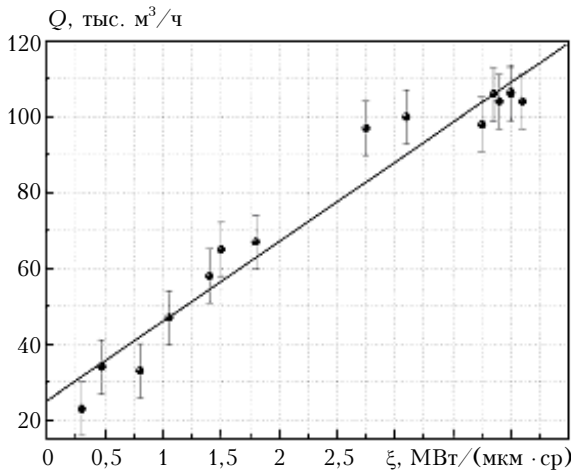


Рис. 2. Экспериментальная зависимость расхода газа Q на факеле Вань-Еганского месторождения от ξ (характеризующей разность засветки пикселя, накрывающего факел R_λ , и фоновых пикселей 20-го канала MODIS $\langle R_\lambda^0 \rangle$) (точки). Прямая (калибровочная) линия — аппроксимация, полученная методом наименьших квадратов. Величина стандартного отклонения σ при подгонке калибровочной прямой составила 7,2 тыс. м³/ч

На данном этапе разработки модели факел рассматривался как плоский источник излучения, встроенный в большой плоский источник меньшей яркости. В качестве основного источника погрешности при построении графика на рис. 2 можно указать неопределенность в величинах мгновенного расхода газа

в факеле в момент зондирования сенсором MODIS, поскольку в нашем распоряжении имелись только среднечасовые измерения.

Для вычисления же $\langle R_\lambda^0 \rangle$ использовались все пиксели, для которых расстояние d между их центрами и центром факельного пикселя удовлетворяет неравенству $1,1a < d \leq 2a$, где a — длина диагонали факельного пикселя. Практически это означает, что для учета фона отбираются пиксели, расположенные через один от факельного пикселя. При этом все пиксели, участвующие в рассмотрении, не должны граничить с облаком. Если же факел находится вблизи края облака, то необходимо исключить из рассмотрения те фоновые пиксели, которые попали на облако.

Зависимость расхода газа от ξ была аппроксимирована по методу наименьших квадратов следующей линейной зависимостью:

$$Q = p_2 + \frac{p_1}{C} \xi, \quad (5)$$

где C — удельная теплота сгорания газа, кДж/м³, характерная для данного месторождения; параметры p_1 и p_2 — подгоночные. Удельная теплота сгорания попутного газа включена в калибровочную зависимость для того, чтобы при изменении состава газа можно было воспользоваться той же калибровкой, лишь заменив данную величину. Из полученной калибровочной зависимости (см. рис. 2) следует, что данный метод потенциально позволяет определять расход попутного газа на факеле, начиная примерно с 30 тыс. м³/ч.

ПО MODIS_Flares

Вышеописанная модель была реализована в оригинальном программном пакете MODIS_Flares под ОС Windows для попиксельной обработки сигналов 20-го канала MODIS и расчетов расхода газа на факеле. На рис. 3 приведен образец формы ПО MODIS_Flares.

Рис. 3. Форма расчета расхода газа на факеле в программе MODIS_Flares

Расчет расхода газа в факеле осуществляется в форме «Расчет избыточного потока», которая

открывается при активации пункта меню «Данные/Расчет». Номера пикселей, относящихся к факеле и к фону, определяются программой автоматически, однако их можно задать и вручную, для этого необходимо в форме «Параметры» включить опцию «Нумеровать пиксели» и, глядя на карту пикселей, самостоятельно выбрать нужные номера. После задания удельной теплоты сгорания газа, характерной для данного месторождения, доли энергии в спектральном интервале и параметров калибровки нажатие на кнопку «Рассчитать» вызовет отображение в текстовом окне следующих параметров: избыточного потока от факела, расхода газа, рассчитанного по формуле (4), и расхода газа, рассчитанного по калибровочной зависимости (5).

Предложенный метод и ПО MODIS_Flares были апробированы. На рис. 4 приведены величины расхода попутного газа на факеле Вань-Еганьского месторождения в 2005 г., полученные из данных MODIS/Terra с использованием предложенной модели и калибровочной зависимости (см. рис. 2).

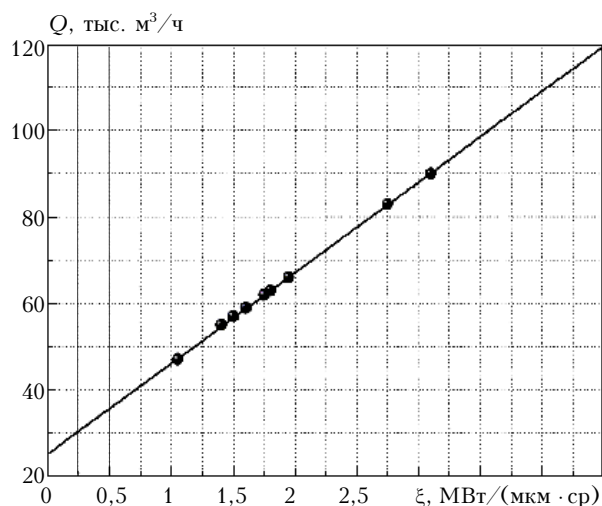


Рис. 4. Данные пробного мониторинга расхода попутного газа на факеле Вань-Еганьского месторождения в 2005 г. по результатам зондирования сенсором MODIS/Terra в 20-м канале в условиях безоблачного неба

Ошибку метода в нашем случае можно охарактеризовать величиной стандартного отклонения при построении данной калибровочной зависимости, абсолютная величина которой составляет $\sigma = 7,2$ тыс. $\text{м}^3/\text{ч}$.

Подчеркнем, что для более качественной калибровки модели желательно иметь много больше измерений, чем было в нашем распоряжении. Малое количество точек в калибровке обусловлено тем, что были отброшены те измерения в отсутствие облака, в которых встретились дефектные пиксели, т.е. измерения с подозрением на близкий край облака, а также измерения, где возможен был солнечный блик от поверхности. Очевидно, чтобы уменьшить влияние различных случайных факторов при построении данной калибровочной зависимости, необходимо делать достаточно большую выборку валидных измерений MODIS. Кроме того, для более адекватной калибровки необходимо пользоваться данными не сред-

нечасового расхода на факеле, а результатами кратковременных измерений, согласованными по времени с данными MODIS. С целью достижения максимальной точности метода имеет смысл калибровать модель независимо для каждого факела.

Заключение

Представленная в данной статье модель и ПО MODIS_Flares (<http://remotesensing.ru>) могут быть использованы в качестве пробного инструмента в системе обработки данных MODIS и количественной оценки мощности факелов и расхода газа на факелах сжигания попутного газа. Удовлетворительные результаты по расходам на факелах, получаемые из данных MODIS в рамках такой простой количественной модели, дают основание для оптимизма в будущем, так как имеется реальная возможность для ее усовершенствования и более тщательной калибровки. Репрезентативный и независимый набор калибровочных данных по мгновенным расходам газа на факелах также может быть сделан в подспутниковых экспериментах путем проведения оптических измерений спектрального состава световых потоков от различных факелов непосредственно на местах. Усовершенствованная и откалиброванная таким образом модель позволит повысить точность определения расходов газа на факелах из данных спутниковых сенсоров типа MODIS и в принципе может быть метрологически сертифицирована в будущем.

В заключение следует отметить, что негативным моментом в методах спутникового мониторинга расхода газа на факелах с использованием сенсоров, работающих в инфракрасном диапазоне, является облачность.

Для валидности метода необходимо, чтобы область вокруг факела на снимке MODIS (размером примерно 10×10 км) была безоблачной, что не всегда реализуется. Однако со спутника на полярной орбите один сенсор MODIS имеет возможность наблюдать местность расположения факела каждые 12 ч, а при использовании данных нескольких сенсоров типа MODIS, имеющих канал 3,66–3,84 мкм и работающих в настоящее время на орбите, вероятность попадания в безоблачные окна в районе расположения факелов сжигания попутного газа существенно возрастает.

В перспективе, с привлечением данных микроволновых (всепогодных) сенсоров, спутниковые методы мониторинга расхода газа на факелах могут быть слабо зависящими от погодных условий и стать эффективным инструментом в национальных и международных системах слежения за выбросами парниковых газов из антропогенных источников.

Авторы выражают благодарность В.В. Белову за полезные дискуссии, касающиеся различных механизмов появления солнечных бликов в инфракрасных каналах MODIS.

1. Кондратьев К.Я., Тимофеев Ю.М. Термическое зондирование земли из космоса. Л.: Гидрометеоиздат, 1970. 280 с.

2. Тимофеев Ю.М., Васильев А.В. Теоретические основы атмосферной оптики. СПб.: Наука, 2003. 474 с.
3. Smith W.L., Revercomb H.V., Zhou D.K., Huang H.-L.A. Hyperspectral sounding: a revolutionary advance in atmospheric remote sensing // Proc. SPIE. 2005. V. 5655. P. 1–11.
4. Huette A.R., Liu H.Q., Bachilly K., van Leeuwen W. A comparison of vegetation indices over global set of TM images for EOS-MODIS // Remote Sens. Environ. 1997. V. 59. P. 440–451.
5. Yamamoto H., Hashimoto T., Seki M., Yuda N., Mitomi Y., Yoshiaka H., Honda Y., Igarashi T. The initial evaluation of ADEOS-II/GLI land products for vegetation monitoring // Proc. SPIE. 2005. V. 5655. P. 241–252.
6. Pagano T.S., Aumann H.H., Hagan D., Overoye K. Prelaunch and In-Flight Radiometer Calibration of the Atmospheric Infrared Sounder (AIRS) // IEEE Trans. Geosci. and Remote Sens. 2003. V. 41. N 2. P. 343–351.
7. Сайт НТИЦ ScanEx: <http://www.scanex.ru>, Москва, Россия.
8. Сайт: <http://eostation.irk.ru>, Иркутск, Россия.
9. Сайт: www.uriit.ru, Ханты-Мансийск, Россия.
10. Gribanov K.G., Zakharov V.I., Tashkun S.A., Tyuterev V.I.G. A new software tool for radiative transfer calculations and its application to IMG/ADEOS data // J. Quant. Spectrosc. and Radiat. Transfer. 2001. V. 68. N 4. P. 435–451. (<http://remotesensing.ru>).
11. Гуревич М.М. Фотометрия (теория, методы и приборы). Л.: Энергоатомиздат, 1983. 272 с.
12. Сводка расхода газа на факеле высокого давления за август 2004 г., ООО «СП ВАНЬЕГАННЕФТЬ», Местоорождение Вань-Еганское.

K.G. Gribanov, V.I. Zakharov, K.S. Alsynbaev, Ya.S. Sulyaev. Method of determination of oil-gas consumption in flares using satellite sounding in IR channels by sensors of MODIS type.

A linear, single-parametr model to evaluate oil gas consumption in flares using satellite sensing in a micro-window of 3.66–3.84 μm by sensors like MODIS is presented. In this model the consumption of oil gas in a flare is proportional to difference of radiances between the pixel covering the flare and neighboring background pixels of the sensor. The magnitude of the parameter is determined from the comparison of simultaneous true measurements of oil gas consumption in the flare and the MODIS data. The proposed model is realized as an original code, calibrated and tested at one of the flares of Khanty-Mansiysk region (61.8 N; 77.2 E) based on MODIS/Terra data.