

УДК 551.501:629.195.1

**ПРИМЕНЕНИЕ КОСМИЧЕСКИХ ДАННЫХ ДЛЯ ОЦЕНКИ
НАПРАВЛЕНИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПРОДУКТОВ СЖИГАНИЯ
НЕФТЯНОГО ПОПУТНОГО ГАЗА В АТМОСФЕРЕ**

Доктор техн. наук А.Х. Ахмеджанов
 А.Н. Искаков
 Т.К. Караданов

Разработана методика использования данных космического зондирования для оценки распространения загрязняющих веществ в атмосфере от факельных установок по сжиганию нефтяного попутного газа.

Проблема независимого количественного контроля природной эмиссии промышленных выбросов парниковых газов в атмосферу является актуальной задачей. Разрабатываемые средства спутникового мониторинга парниковых газов являются перспективными для их включения в общую систему национального и международного контроля эмиссии парниковых газов в атмосферу. Спутниковые сенсоры нового поколения имеют большие потенциальные возможности для решения этой задачи, т.к. космические изображения сенсора типа MODIS доступны для широкого пользования. Этот сенсор имеет приемлемое для такого рода задач пространственное разрешение. Размер пикселя 1×1 км при наблюдении в надир с соответственным увеличением при увеличении угла сканирования. Проведенный анализ тепловых космических изображений показал, что наблюдаемые максимумы интенсивности теплового излучения чувствительны к изменениям температуры атмосферы по высоте. Наблюдаемые из космоса максимумы интенсивности теплового излучения распределяются следующим образом: в 20 канале – для земной поверхности, в 22 и 23 каналах – основной максимум на земной поверхности и слабые локальные максимумы на высотах 1...4 км, в 25 канале – максимумы наблюдаются на высотах 1...7 км без максимума на земной поверхности. Эти особенности означают, что в 20 канале можно фиксировать работающие факельные установки непосредственно на земной поверхности. В 22 и 23 каналах сенсор принимает излучение с нижних слоев атмосферы, а в 25 канале поступает излучение с нижней тропосферы.

Одним из основных источников загрязнения атмосферы на разрабатываемых нефтяных месторождениях Западного Казахстана являются факельные установки для сжигания нефтяного попутного газа. Вокруг факелов формируются обширные шлейфы аэрозольного загрязнения. Их негативное воздействие усиливается мелкодисперсными продуктами неполного сгорания. Они наблюдаются из космоса дистанционным зондированием в тепловом режиме, что позволяет вести за ними космический мониторинг. Поэтому одной из важных задач является космический мониторинг работающих факельных установок по сжиганию попутного нефтяного газа на месторождениях нефти [1, 2].

Для вычисления распространения загрязняющих веществ в атмосфере необходимо знание направления и скорости ветра, а также значение коэффициента турбулентного перемешивания. Положим горизонтальный турбулентный обмен пропорциональным скорости ветра, ось x совпадает со средним направлением ветра, а ось y поперечно расположена вектору скорости ветра. Тогда концентрация примеси от точечного источника может быть определена по гауссовому распределению или численному решению уравнения турбулентного переноса примеси в атмосфере.

В формуле расчета распространения примеси модуль скорости ветра и коэффициент турбулентного перемешивания заменен коэффициентом пропорциональности между ними согласно следующему выражению:

$$q(x, y) = \frac{M}{2\sqrt{\pi k_0 x}} e^{-\frac{y^2}{4k_0 x}}, \quad (1)$$

где $q(x, y)$ – концентрации примеси от точечного и линейного источника соответственно; k_0 – коэффициент пропорциональности между скоростью ветра и горизонтальным турбулентным обменом; ось x совпадает со средним направлением ветра; ось y поперечно расположена вектору скорости ветра; M – мощность источника.

Для определения коэффициента пропорциональности между скоростью ветра и горизонтальным турбулентным обменом рассмотрим распределение температуры вокруг источника.

Для решения вопроса распространения загрязняющих веществ в атмосфере от работающих факельных установок требуется определить направление и скорость ветра, коэффициент турбулентного обмена. Эти параметры можно получить из данных космического зондирования. Для решения этих задач можно использовать цифровую спутниковую информацию, поступающую

щую с искусственного спутника Земли (ИСЗ) TERRA/MODIS. Космический снимок для 21 теплового канала (длина волны 3,929...3,989 мкм) представляется в виде численной матрицы, состоящей из значений интенсивности фиксируемых излучений ($\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{мкм}$ ср). Температурное поле земной поверхности определяется по формуле Планка с использованием цифровой спутниковой информации. В полученном температурном поле выделяются локальные максимумы. Температурные максимумы, попадающие на территории месторождений, можно считать работающими факельными установками.

Основные упрощающие предположения:

- рассматриваются космические тепловые снимки в случаях безоблачной атмосферы;
- выбираются каналы диапазона волн, попадающие в «окна прозрачности».

Изучение спектров тепловых потоков длинноволновой радиации с земной поверхности в ночное время показало, что с достаточной степенью точности земную поверхность можно считать черным телом.

Предположим, что подстилающая поверхность излучает как черное тело при температуре $T(p_0)$, где p_0 – значение давления на уровне земной поверхности.

Интенсивность I_λ излучения, уходящего с верхней границы атмосферы и регистрируемого аппаратурой спутника, может быть определена из следующего интегрального уравнения

$$I_\lambda = B_\lambda(T_0)e^{-\frac{\alpha_\lambda m}{\cos \vartheta}} + \frac{\alpha_\lambda}{\cos \vartheta} \int_0^m B_\lambda(T(u))e^{-\frac{\alpha_\lambda(m-u)}{\cos \vartheta}} du, \quad (2)$$

где $B_\lambda(T_0)$ – функция Планка при температуре T_0 , $m = \int_0^z \rho_n dz$, где ρ_n – плотность вещества, поглощающего тепловое излучение, ϑ – угол зондирования, α_λ – коэффициент поглощения.

В инфракрасном диапазоне длин волн имеются участки спектра 3,4...4,2 и 8,0...12,0 мкм, которые называются «окнами прозрачности». В них уходящая тепловая радиация близка к собственному тепловому излучению земной поверхности.

Влияние водяного пара, углекислого газа и озона для этих длин волн минимально, поэтому поглощением уходящего теплового излучения на указанных каналах можно пренебречь. Диапазон длин волн 21 канала

входит в указанное первое окно прозрачности. В этом диапазоне коэффициент поглощения имеет близкое к нулю значение, поэтому уравнение (2) можно переписать в виде

$$I_{\lambda} = B_{\lambda}(T_0). \quad (3)$$

Таким образом, интенсивность теплового излучения, измеряемого на спутнике, выражается через формулу Планка

$$I_{\lambda,i,j} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda k T_{i,j}}} - 1}, \quad (4)$$

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

Из выражения (4) значение температуры земной поверхности можно определить:

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

По этим значениям можно построить температурное поле, где локальным максимумам будут соответствовать тепловые источники, выделенные пороговой температурой. На основе распределения температуры, для рассматриваемой территории, по космическим данным и на базе уравнения стационарного переноса излучения без учета притока тепла в двумерном случае с учетом предположения, что одна из координатных осей направлена вдоль направления переноса, коэффициент пропорциональности k_0 может быть определен по соотношению:

$$k_0 = \Delta T / \frac{\partial T}{\partial x}, \quad (6)$$

где $\Delta T = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}$ – лапласиан, $\frac{\partial T}{\partial x}$ – градиент температуры.

Рассматриваемая методика представляет собой модель начального уровня, которая должна быть в дальнейшем усовершенствована. Технологическая схема тематической обработки теплового изображения MODIS и распределение относительной концентрации продуктов сгорания попутного нефтяного газа представлены на рисунке 1. Расчет проводился с точностью до 1 %, принимая значение мощности источника за 100 %.

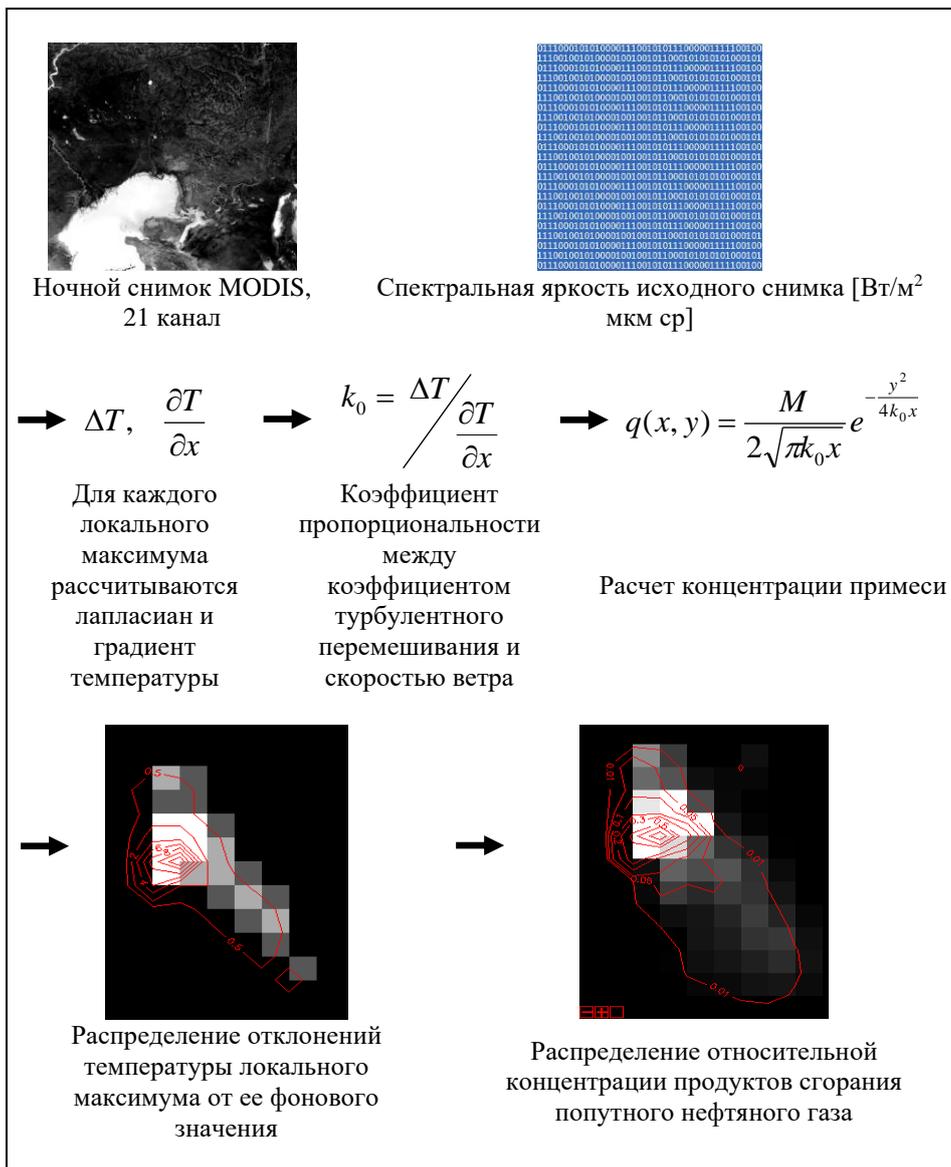


Рисунок. Технологическая схема тематической обработки теплового изображения MODIS.

Из распределения расчетных отклонений температуры можно сделать вывод о том, что горизонтальный перенос загрязняющих веществ на локальном максимуме направлен на юго-восток, а на поперечное распределение влияет турбулентное перемешивание.

Результаты данной работы показывают, что по детальному анализу данных космического зондирования земной поверхности можно рассчи-

