

Метод оценки объемов сжигаемого газа по данным дистанционного зондирования

А.И. Годунов, М.Н. Жижин

Геофизический центр РАН,
119296 Москва, Молодежная 3
E-mails: agodunov@wdcb.ru, jjn@wdcb.ru;

В работе предложен новый метод оценки факельного сжигания попутного газа по данным дистанционного зондирования Земли со спутников DMSP, полученных в ночное время. В качестве модели снимков ночных огней взята смесь гауссовых функций. Рассмотрены основные проблемы при аппроксимации изображений моделью и предложены пути их решения. Для оценки объемов сожженного газа использовалась регрессия параметров видимого факела и объемов сожженного газа, известных для некоторых скважин. Результаты анализа визуализируются совместно с исходными данными на платформе Google Maps, что дает возможность удобной оценки динамики горения.

Ключевые слова: факельное сжигание попутного газа, спутники DMSP, дистанционное зондирование, карта ночных огней.

Введение

Сжигание попутного газа широко распространено в нефтедобывающей и нефтеперерабатывающей промышленности в тех местах, где недостаточно развита инфраструктура для его использования. Мировой уровень сжигания попутного газа остается стабильным на протяжении последних 15-ти лет в диапазоне от 140 до 170 млрд. куб. м в год с потенциальной розничной ценой в 68 млрд. долларов. По оценкам Национального центра геофизических данных NOAA США, в 2008 г. выбросы в атмосферу составили более 278 млн. т эквивалента двуокиси углерода CO₂ (Elvidge, 2009). Как известно (Gore, 2006), контроль за объемом выбросов двуокиси углерода может существенно повлиять на скорость глобального изменения климата. При этом основной проблемой по контролю сжигания газа является отсутствие возможности независимой проверки официальных отчетов стран и отдельных нефтяных компаний. В данной работе рассмотрен предложенный К. Элвиджем и соавторами (Elvidge, 2009) метод оценки объемов сжигаемого попутного газа в регионе по изображениямочной стороны Земли, полученным с американских спутников DMSP, и предложен новый метод оценки объемов сжигания попутного газа по отдельным факелам.

Ежегодные карты ночных огней с 1991 по 2009 гг. получаются с помощью осреднения за год изображений безоблачной части Земли в ночное время. Отдельный интерес представляет технология работы с картами ночных огней, полученными с разных спутников за разные годы. Для проведения сравнительного анализа необходима калибровка за прибор, т.к. телескопы с разных спутников регистрируют один и тот же источник в разное время и с разной чувствительностью. Для одновременной работы со всем набором карт необходима организация данных и сервисы доступа, которые позволяют быструю выборку отдельных фрагментов (точка, прямоугольник) из разных карт. Для этого в работе используется распределенная база данных для многомерных массивов ActiveStorage и сервисы удаленного доступа к данным для клиентов по технологии .NET и Java.

В результате осреднения изображения газовых факелов имеют форму ярких округлых пятен. Минимизируя невязку между изображениями факелов и моделью горения, которая

задает его яркость, площадь и продолжительность горения, можно косвенно оценить объем сжигаемого газа. Для такой оценки в работе использовалась регрессия параметров видимого факела и объемов сожженного газа, известных для некоторых скважин. Результаты анализа визуализируются совместно с исходными данными на платформе Google Maps, что дает возможность удобной оценки динамики горения.

Исходные данные

В работе К. Элвиджа (Elvidge, 2009) была исследована возможность использования спутниковых данных дистанционного зондирования для идентификации газовых факелов и оценки объемов сжигаемого в них газа. Благодаря способности спутниковых сенсоров периодически собирать данные по большим территориям, такие данные обладают хорошей потенциальной возможностью для наблюдения за активностью горения газовых факелов. В качестве исходных данных были использованы изображения, полученные в условиях низкой освещенности оперативной системой линейного сканирования (OLS) в рамках американской Военной метеорологической спутниковой программы США DMSP.

Исходные изображения, использовавшиеся в данной работе, представляют собой 8-ми битные изображения, полученные путем усреднения цифровых значений, накопленных за год в ночное время с датчиков видимого спектра спутников DMSP. При этом при формировании изображения ночных огней используются данные, удовлетворяющие таким критериям как отсутствие облаков, лунного света, бликов на линзах, полярных сияний и др.

На рисунке 1 представлен полученный К. Элвиджем график зависимости объемов сожженного попутного газа на факелях от суммы значений пикселей в областях изображений, где находятся эти факелы. Коэффициент детерминации при построении линейной регрессии получился равным 0,975, что говорит о потенциальной применимости данного метода для оценки объемов сжигаемого газа по изображениям ночных огней. Данные по России не учитывались при построении регрессии, т.к. они не вписывались в общую зависимость. Данные по сожженному попутному газу были предоставлены Всемирным Банком.

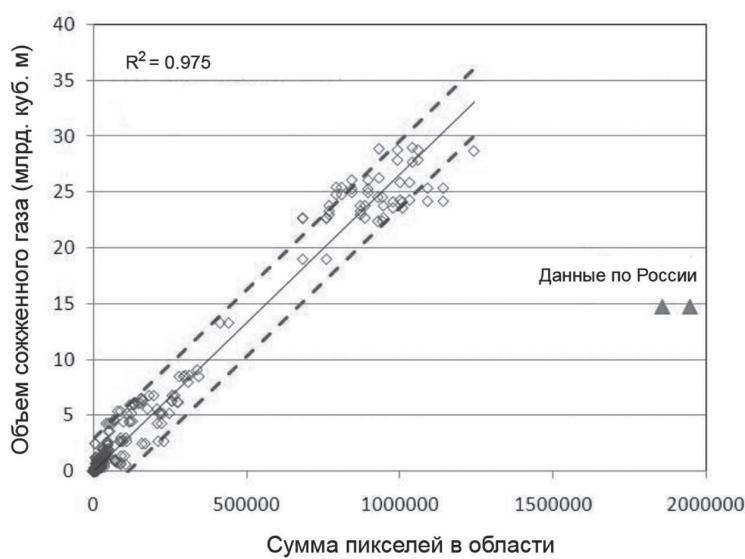


Рис. 1. График зависимости между объемом сожженного попутного газа (млрд. куб. м) и суммарной интенсивностью свечения ночных огней в области. Доверительный интервал обозначен пунктирной линией

Модель изображения ночных огней

Изображения свечения единичных факелов имеют окружную форму с ярким центром, хорошо аппроксимирующиеся двумерной гауссовой функцией

$$h_i(\bar{\mathbf{x}}) = w_i \cdot \exp\left(-\frac{(x_1 - c_{i1})^2 + (x_2 - c_{i2})^2}{r_i^2}\right).$$

Параметры i , w_i , $\bar{\mathbf{c}}_i$ и r_i функции $h_i(\bar{\mathbf{x}})$ означают номер факела, его высоту, центр и радиус соответственно. Моделью изображений ночных огней была выбрана смесь гауссовых функций

$$f(\bar{\mathbf{x}}) = \sum_{i=1}^k h_i(\bar{\mathbf{x}}).$$

Идентифицировать факелы можно путем поиска локальных максимумов на изображении, но из-за высокой чувствительности спутников, иногда происходит частичное засвечивание изображений яркими факелами, в результате чего такие факелы получаются «срезанными». Также близлежащие факелы «сливаются» на изображении, в результате чего они имеют вытянутую форму с одним локальным максимумом (рис. 2). Поэтому был необходим алгоритм, позволяющий идентифицировать факелы в таких случаях.

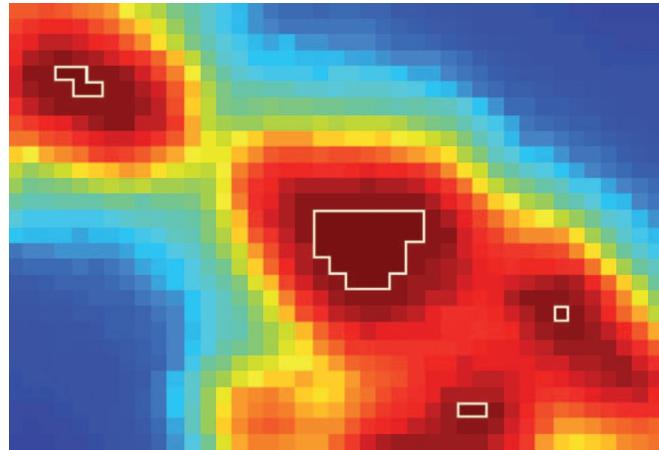


Рис. 2. Фрагмент изображения с близлежащими факелами и частичным засвечиванием его яркими факелами (выделено белым контуром)

Заметим, что линии уровня двумерной гауссовой функции представляют собой окружности разного радиуса с общим центром. Поэтому, центры гауссовых функций искались при помощи преобразование Хафа для поиска окружностей на изображениях (Гонсалес, 2006). Результат автоматической идентификации газовых факелов данным методом представлен на рис. 3.

Радиусы r_i были выбраны как средний радиус отдельно стоящих единичных факелов при аппроксимации их по МНК. Минимизируя невязку $S = \sum_{j=1}^p \|y_j - f(\bar{\mathbf{x}}_j)\|^2$ между моделью и изображением ночных огней, содержащим p пикселей со значениями y_i в точках $\bar{\mathbf{x}}_j$, были получены значения для высот факелов w_i . На рисунке 4 представлен фрагмент аппроксимации изображения ночных огней смесью гауссовых функций данным способом.

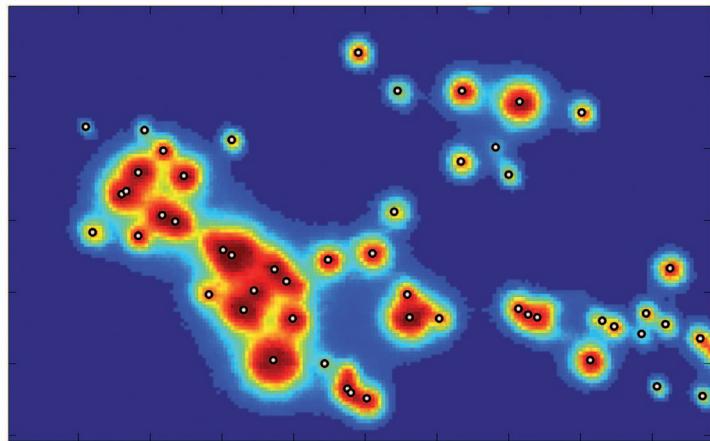


Рис. 3. Результат идентификации факелов, центры которых обозначены черно-белыми кружками

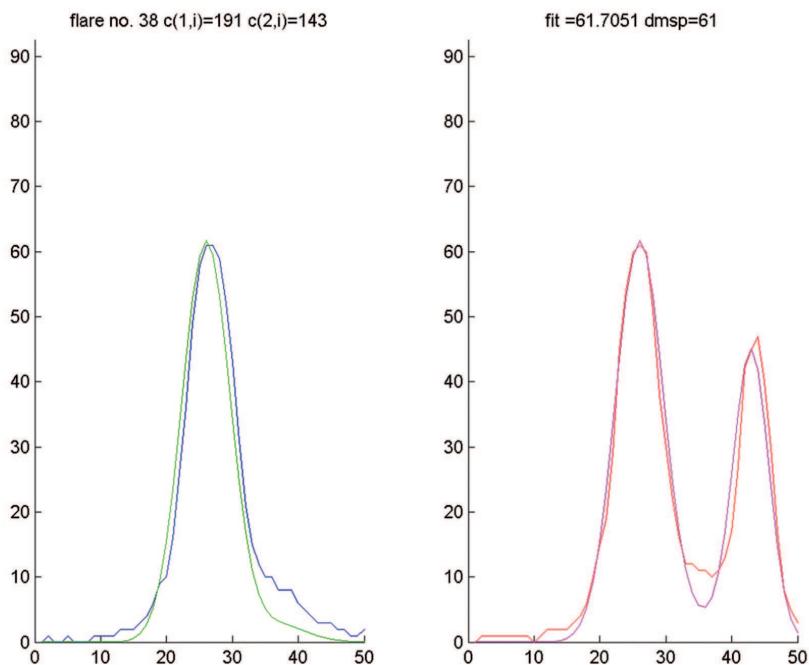


Рис. 4. Горизонтальный (слева) и вертикальный (справа) срезы при аппроксимации фрагмента изображения с двумя близлежащими факелами

Анализ зависимости объемов сжигания попутного газа от параметров свечения факелов

Для исследования зависимости объемов сжигаемого газа от параметров свечения газовых факелов, полученных в ходе аппроксимации изображения ночных огней Нигерии с помощью гауссовых функций, газовые факелы, по которым имеются отчетные данные, были соотнесены соответствующим детектированным факелам на изображениях. Изображения ночных огней были получены со спутника F15 в 2004 году, а данные по сожженному газу предоставлены Всемирным Банком. На рисунке 5 представлен график зависимости объемов сжигаемого газа (млрд. куб. м.) от интенсивности свечения факелов (максимальное зна-

чение гауссовой функции), где у нее прослеживается линейный характер. После построения линейной регрессии, коэффициент детерминации R^2 получился равным 0,87, что говорит о высокой степени линейной зависимости и свидетельствует о потенциальной пригодности данного метода для мониторинга сжигаемого газа.

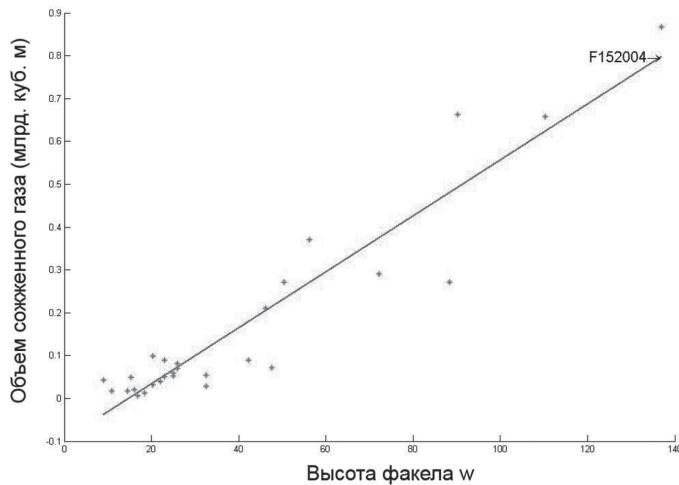


Рис. 5. Зависимость объемов сжигаемого газа (млрд. куб. м.) от интенсивности свечения факелов (максимальное значение гауссовой функции)

Визуализация результатов

Для формирования статистики сжигания газа в факелях на протяжении времени их горения, необходимо связать идентифицированные факелы на разных снимках за разные годы между собой. Для этого все детектированные факелы кластеризуются по пространству и времени (1992-2009гг.) по мере сходства, которая равна евклидову расстоянию между центрами факелов в разные годы и бесконечна для факелов в один год. Таким образом в кластера попадают те факелы, которые были идентифицированы на разных снимках и расположены неподалеку друг от друга. Такие кластеры интерпретируются как один факел. Пример такого кластера показан на рис. 6.

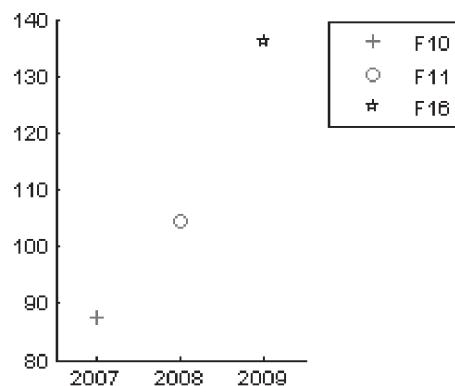


Рис. 6. Три факела, детектированные на снимках F102007, F112008 и F162009 и объединенные в один факел, горевший в 2007-2009гг.

Таким образом, получается множество временных рядов с оцененными данными по сожженному газу для различных факелов. Для визуализации результатов на карты сервиса Google Maps были наложены изображения ночных огней по технологии Tile Server. Результаты детектирования сохраняются в формате KML, а затем отображаются на изображениях ночных огней с помощью сервиса Google Maps (Рис. 7). Щелкая по желтым кнопкам, пользователь может выбрать факел и просмотреть историю его горения.

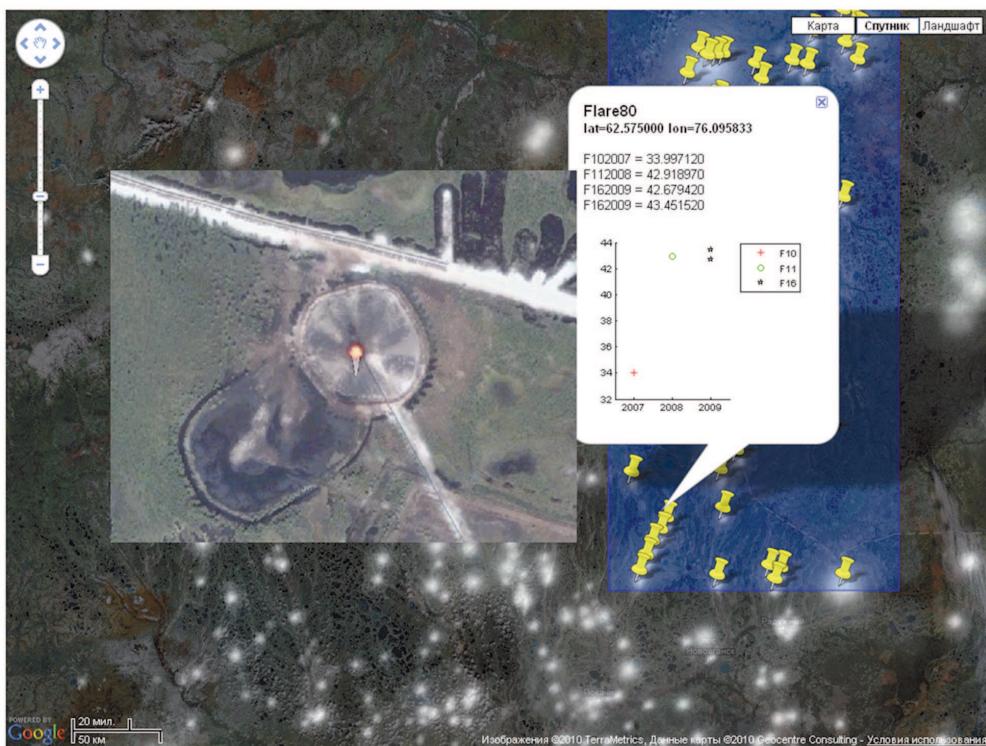


Рис. 7. Визуализация результатов с помощью сервиса Google Maps. Щелкая по желтым кнопкам, пользователь может выбрать факел и просмотреть историю его горения

Выводы

В данной работе была исследована возможность использования спутниковых изображений ночных огней для оценки объемов сжигаемого попутного газа. В качестве исходных данных были использованы изображения с Американских метеорологических спутников DMSP, которые имеют самую высокую чувствительность сенсоров в ночное время.

Изображение отдельных факелов на этих снимках выглядит как светлое пятно окружной формы с ярким центром и достаточно хорошо аппроксимируется гауссовой функцией, поэтому математической моделью изображения ночных огней была выбрана смесь гауссовых функций. Для минимизации невязки, определяющей расхождение между световыми пятнами от факелов и моделью горения, необходимо заранее определить количество факелов, а также задать начальные приближения для их центров. Поиск факелов на изображениях был выполнен с помощью преобразования Хафа для окружностей. Был установлен линейный характер зависимости между интенсивностью свечения факела и объема сжигаемого газа, что потенциально дает возможность независимого мониторинга сжигания газа. В работе использовался ограниченный набор данных и привлечение дополнительных мате-

риалов позволит получить более точные оценки. Для визуализации результатов был использован сервис Google Maps, что дает возможность удобного просмотра и публикации истории горения факелов.

Мы предполагаем, что аналоговые изображения, доступные с 70-х годов, после оцифровки, геопривязки и калибровки яркости, позволяют продлить анализ истории сжигания газа в прошлое еще на 10-15 лет. Требует дополнительного исследования вопрос зависимости между объемом добычи нефти и яркостью факелов от сжигания попутного газа. Для оценки трендов изменения яркости ночных огней возможно применять не только для анализа добычи нефти, но и для анализа социально-экономических показателей регионов (Максимов, 2009).

Литература

1. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений // М.: Техносфера, 2006, 1072 с.
2. Максимов Н. Ночной надзор // Newsweek, 11.2009.
3. Elvidge C., Ziskin D. etc. A fifteen year record of global natural gas flaring derived from satellite data // Energies, 2009. 2. P. 595-622.
4. Gore A. An inconvenient truth: the planetary emergency of global warming and what we can do about it. // Rodale Books, 2006, 328 pp.

Estimation of natural gas flaring from satellite data

A. I. Godunov, M. N. Zhizhin

Geophysical center of RAS
119296 Moscow, 3 Molodezhnaya str.
E-mails: agodunov@wdcb.ru , jjn@wdcb.ru ;

In this paper we propose a method for gas flaring volume estimation based on the analysis of night-time remote sensing data obtained from DMSP satellites. A mixture of Gaussian functions is used as a night-time imagery model. The main problems of the imagery model approximation are addressed. Gas flaring volume is estimated based on the regression of the parameters of an observed flare and the known flaring volume for several other flares. The analysis results are visualized together with source data using the Google Maps platforms, which makes a convenient tool for the assessment of gas flaring dynamics.

Keywords: gas flaring, satellites DMSP, remote sensing, nighttime lights.