



УДК 528.88

**К. С. Алсынбаев, В. М. Брыксин, А. В. Евтюшкин
Г. Н. Ерохин, А. В. Козлов**

**ОЦЕНКА МОЩНОСТИ ФАКЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК
ПО СЖИГАНИЮ ПОПУТНОГО НЕФТЯНОГО ГАЗА
НА ОСНОВЕ ОБРАБОТКИ КОСМОСНИМКОВ MODIS**

Описана модифицированная методика оценки мощности факельных установок по сжиганию попутного нефтяного газа на основе обработки космоснимков MODIS. Создан программный комплекс оценки объемов сожженного попутного нефтяного газа для заданных факельных установок и лицензионных участков в пределах выбранных календарных промежутков времени. Методика и программный комплекс апробированы для наиболее мощных факельных установок нефтяных месторождений Западной Сибири. Проведенные исследования показали, что превышение расчетных данных по сравнению с отчетными сведениями недропользователей составляет до 2 раз.

131

Described modified method for estimating flares power of burning associated gas by processing satellite images MODIS. The program complex estimates associated flared gas volume for a given torch unit and licensed areas within the selected calendar periods. The methodology and software system tested for the most powerful oil fields torch units in Western Siberia. Investigations held by us have shown that exceeding of the calculated data as compared to report information is up to 2 times.

Ключевые слова: космоснимок, попутный нефтяной газ, факельная установка, геопортал, дистанционное зондирование, модель, карта.

Key words: Space image, associated gas, torch unit, geoportals, remote sensing, model, map.

Как известно, попутный нефтяной газ (ПНГ) растворен в пластовой нефти и выделяется при ее добыче. Несмотря на то что ПНГ является ценным сырьем для энергетики и химической промышленности, его использование (утилизация) в нашей стране проблематично из-за ряда причин: недостаточного развития инфраструктуры его транспортировки и переработки, высокой начальной себестоимости доставки его потребителям и других. Поэтому значительная часть ПНГ сжигается на факельных установках (ФУ) на предприятиях первичной переработки нефти (центрах предварительного сбора, цехах первичной подготовки нефти) после сепарации компонент скважинной жидкости, а также на других узлах нефтедобычи, например на дожимных насосных станциях (ДНС).

Сжигание ПНГ на ФУ негативно сказывается на экологическом состоянии окружающей среды, заметно способствует поступлению в атмосферу Земли парниковых газов, что обуславливает важность регулярного получения информации органами власти, общественности, международных организаций об объемах и характере сжигания ПНГ.

Значения объемов сожженного на ФУ ПНГ известны по отчетным данным недропользователей. Однако в России в силу объективных и



субъективных факторов сложилась ситуация, когда эти суммарные сведения формируются со значительной погрешностью. Причин несколько. ПНГ в процессах нефтедобычи является неоднородной физической средой, поэтому расходомеры на газовых магистральных в принципе не обладают высокой точностью. На многих месторождениях расходомеры не установлены, и сведения об объемах ПНГ составляют по расчетным данным в зависимости от других показателей: объемов добытой скважинной жидкости и сырой нефти, газового фактора, параметров технологических установок. В любом случае недропользователи могут трактовать погрешности в сторону уменьшения объемов сжигания.

В сложившейся ситуации целесообразно иметь альтернативные источники информации. Один из таких источников — данные дистанционного зондирования Земли с космических аппаратов. Так, в мировой практике хорошо известен подход, основанный на оценке объемов сгораемого ПНГ в различных регионах по светимости ночных огней [1; 2] на основе сенсора DMSP. С 2012 г. ведутся исследования по результатам обработки снимков сенсора NPP [3]. Коллектив авторов в различные годы принимал участие в разработке методики оценки мощности ФУ на основе анализа космических снимков сенсором MODIS.

В 2004–2006 гг. совместно с исследователями Уральского государственного университета при поддержке правительства ХМАО-Югры был принят первый подход для оценки мощности ФУ по тепловым каналам сенсора MODIS, в частности путем измерений яркости свечения ФУ (в канале 20 — тепловые значения) [4]. Методика апробирована на анализе данных по ФУ с координатами 61° 48' 45" СШ 77° 13' 49" ВД (в системе координат WGS-84) на Ван-Еганском месторождении. Для данной факельной установки у авторов методики имелись достаточно достоверные показания системы оперативного учета газа (комплекс датчиков, вычислительное устройство и программное обеспечение RL101 RocLink фирмы Fisher-RosemountEuropes), установленной на центральном пункте сбора месторождения. Показания являлись архивными сведениями о расходе газа на ФУ: почасовые за 08.2004 и по дням с начала 2004 г. по конец 08.2004. На снимках MODIS 08.2004 была проведена калибровка методики оценки мощности ФУ по летним снимкам. Методика предполагает учет яркости пикселя, соответствующего площадке (размером порядка 1 × 1 км для центральной полосы снимка и до 1 × 4 км для краев), содержащей ФУ, и яркостей фоновых точек в формуле

$$Q = \frac{4\pi(R_\lambda - R_\lambda^0)S_{pix} \cos \theta}{CF_\lambda}, \quad (1)$$

где R_λ — спектральная плотность энергетической яркости пучка излучения, приходящего с поверхности пикселя MODIS площадью S_{pix} ; θ — зенитный угол спутника; C — удельная теплота сгорания попутного газа; Q — расход подаваемого газа в тысячах м³ в час; F_λ — плотность распределения энергии излучения факела по спектру.

Величину F_λ можно определить экспериментально, измеряя спектры факелов, но на практике он был подобран исходя из известных значений мощности экспериментальной ФУ в качестве подгоночного модельного



коэффициента. R_{λ}^0 является средней спектральной плотностью фоновых точек в окрестности факела. Важная особенность методики – сравнение яркости излучения пикселя, соответствующей площадке, содержащей ФУ, с яркостью пикселей, соответствующих фону ФУ, то есть участкам ландшафта вне технологических площадок с ФУ. Собственно, использование светимости точек фона используется в формуле (1) для локальной калибровки светимости пикселей с ФУ (R_{λ}) в условиях изменчивых значений прозрачности атмосферы и освещенности.

В последующие годы проводились также другие исследования на основе снимков MODIS как в контексте исследований сжигания ПНГ на ФУ, так и в рамках экологических и прикладных исследований [5; 6].

На этапе исследований 2011–2012 гг. стояла задача модификации методики для распространения на другие ФУ ХМАО-Югры. Для ее осуществления использован имеющийся фактографический материал: отчетные данные недропользователей об объемах сожженного газа в привязке к лицензионным участкам и нефтедобывающим компаниям, топографические данные, открытые данные о границах лицензионных участков, коллекции снимков низкого, среднего и высокого разрешения. С применением автоматизированных методов созданы картосхемы состояния лицензионных участков на 2005 и 2012 гг. На основе анализа космоснимков и картографических материалов дешифрированы несколько сотен ФУ и группы близко расположенных факельных установок (ГФУ), с точностью геопривязки от 10 до 50 м. В окрестностях всех ФУ подобраны точки-презтенденты для использования в качестве значений фона с условием определенной ландшафтной однородности (как правило, зоны растительности). Создана корректная геореляционная база, объединяющая отчетные данные недропользователей, лицензионные участки, ФУ и ГФУ, расчетные характеристики. В частности, геобаза позволила интегрировать расчетные данные по лицензионным участкам и провести совместный анализ расчетных и отчетных данных [7; 8]. Разработана методика представления больших и сверхбольших объемов геоданных [9]. Необходимо было также создать алгоритмы точной локальной геопривязки участков снимков MODIS для совмещения тепловых проявлений ФУ с размещением ФУ, дешифрированных на основе снимков Landsat и QuickBird. Ниже подробно излагаются подходы некоторых этапов исследований.

Так как при разработке формулы (1) допущены определенные упрощения, была проведена дополнительная калибровка модели, которая выполнялась на серии снимков радиометра MODIS, содержащих ФУ высокого давления Ван-Еганского месторождения, причем на моменты съемки приходились почасовые данные расходомеров. В первоначальной модели предполагалось, что для расчета используется значение спектральной плотности в точке с предварительно заданными координатами ФУ. Однако в процессе проведения экспериментов было выявлено, что интенсивность горения на ФУ может быть настолько высока, что влияние ее на соседние пиксели существенна. Таким образом, было принято решение при расчетах учитывать уровень плотности в соседних пикселях к пикселю снимка, покрывающего ФУ.

Для устранения проблемы неточности геопространственной привязки была разработана методика автоматической привязки снимков по заранее



выбранным наиболее ярким ФУ. Расчет уровня яркости осуществлялся в некоторой области вокруг заданных ФУ, где выбиралась наиболее яркая точка в диапазоне, и рассчитывались смещения между найденной точкой и известными географическими координатами базовой ФУ.

Так как неизвестен мгновенный расхода газа в ФУ в момент регистрации сенсором MODIS, а имелись только среднечасовые измерения, возникали погрешности в расчетах. Такое несоответствие потребовало введения некоторой корректирующей регрессионной модели:

$$Q^* = \begin{cases} 0,5937 \cdot Q + 5,1339 & \text{при } Q < 150, \\ 31,823 \cdot \ln Q - 68,321 & \text{при } Q \geq 150, \end{cases} \quad (2)$$

134

где Q^* — скорректированное значение расхода подаваемого газа в тысячах м^3 в час. Коэффициент корреляции для линейной модели составил 0,82, для логарифмической модели — 0,76. Общее эмпирическое корреляционное отношение — 0,9. Суммарный расход за рассматриваемый период — 62983 тыс. м^3 , а расчетный — 62663 тыс. м^3 , то есть точность расчета для тестовой ФУ в заданный промежуток времени составила 99,5%.

Разработанная методика была распространена на территорию ХМАО-Югры. Для обработки брались снимки уровня L1B (с геопривязкой и без обработки так называемой «бабочки» — удвоения изображения на некоторых соседних строках на краях космоснимка). Расчет «мгновенного» расхода проводился для каждой ФУ из созданной ранее базы данных. Результаты расчетов, в свою очередь, помещались в базу данных с указанием даты снимка. Для каждой ФУ (ГФУ) проводилась аппроксимация мощности для каждого месяца года и вычислялся объем сожженного ПНГ. Поскольку по реляционным связям можно установить принадлежность ФУ к лицензионному участку и недропользователю, можно вычислить объем ПНГ, сожженного для конкретного лицензионного участка или недропользователя за год.

В результате проведенного анализа было выявлено, что на большинстве лицензионных участков сжигаются сравнительно небольшие объемы ПНГ, а основной объем сжигается на мощных ФУ нескольких десятков лицензионных участков. Для упрощения модели было предложено не проводить расчеты по небольшим лицензионным участкам и не учитывать в расчетах малые ФУ. Таким образом, были отобраны 17 лицензионных участков. Проведенные по ним по данной методике расчеты за 2005–2007 гг. показали, что эмпирический коэффициент корреляция между расчетными и отчетными данными равен 0,96.

Было обработано 11056 снимков MODIS за 2003–2011 гг. до уровня 2A общим объемом более 6 ТБ. Полученные данные обрабатывались согласно методике, описанной выше. Было получено 446012 расчетных значений мощности горения для различных ФУ пилотной территории.

На основе расчетов получены контрольные расчетные значения годовых объемов для 17 лицензионных участков, сравнительный анализ которых с отчетными данными недропользователей приведен на рисунке 1. Проведенное сравнение показало, что превышение расчетных данных по сравнению с отчетными сведениями недропользователей на пилотном участке составляет до 2 раз. Как видно из диаграммы на ри-



сунке 2, в целом наблюдается тенденция постепенного снижения объемов сжигания ПНГ с пиком в 2005 г., что соответствует оценкам, полученным другими способами.

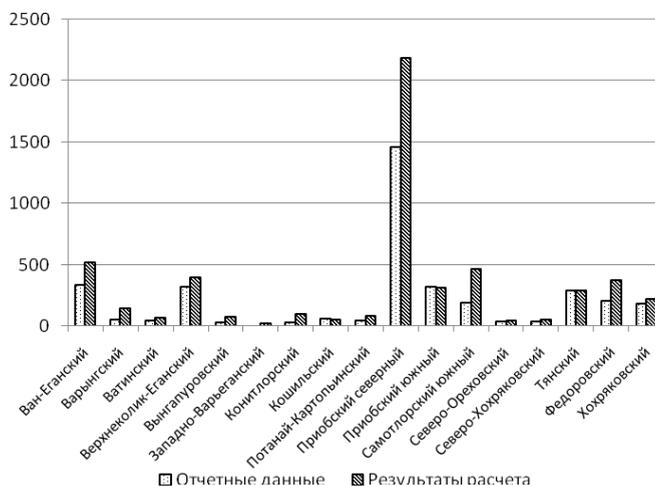


Рис. 1. Сравнение отчетных данных по объему сжигания ПНГ по 17 лицензионным участкам с расчетными данными за 2006 г. (млн м³ в год)

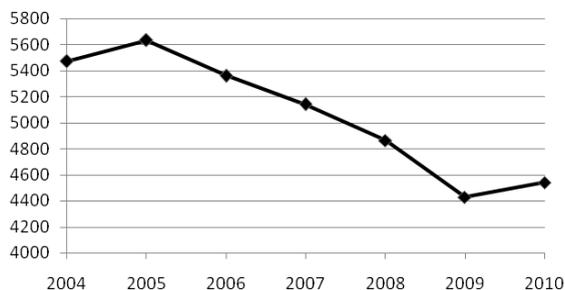


Рис. 2. Суммарный расчетный объем сжигания ПНГ по 17 лицензионным участкам за 2004 – 2010 гг. (млн м³ в год)

В рамках грантового проекта партнерами авторов, сотрудниками Курчатовского института и Геофизического центра РАН, проводились исследования по определению мощности ФУ на основе светимости ночных огней на сенсорах OLS DMSP [1; 2], основываясь на анализе композитных карт по годам. Собственно, сами композитные снимки дают выразительную качественную картину, где мощность ФУ отражается размером округлой зоны и значением пикселей центральных зон. Поэтому возможно картографическое сравнение снимков OLS DMSP, MODIS и диаграмм расчетных данных за год для ФУ. На рисунке 3 приведено сравнительное картографическое представление интегральной композиции ночных огней OLS DMSP и диаграмм расчетного годового объема сжигания выборки мощных и средних ФУ по снимкам

MODIS (2006 г.). Анализ снимков показывает сходство проявления мощности ФУ на всех трех видах проявления горения ПНГ.

Заметим, что методика оценки объемов сожженного газа на основе обработки снимков MODIS может дать большую точность, если провести следующую модификацию, опирающуюся на дополнительный комплекс контрольных данных с нескольких ФУ на территории Западной Сибири, включающую почасовые и подневные аппаратные измерения расхода газа, его состава (или значения его удельной теплоты сгорания), характеристики ФУ (высота, скорость истечения струи).

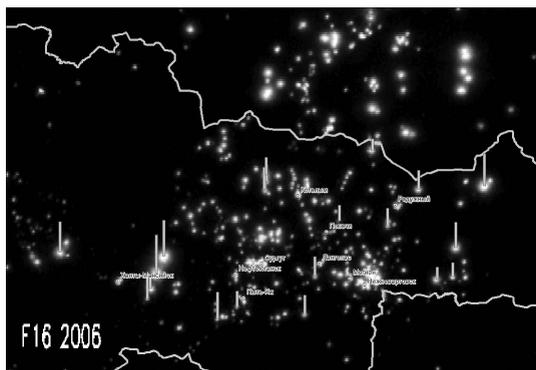


Рис. 3. Расчетные мощности отдельных ФУ (вертикальные гистограммы) в сравнении с данными светимости, полученными в результате обработки DMSP

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 11-07-12058.

Список литературы

1. Elvidge C., and so on. A fifteen year record of global natural gas flaring derived from satellite data // *Energies*. 2009. №2. P. 595 – 622.
2. Годунов А. И., Жижин М. Н. Метод оценки объемов сжигания попутного газа по спутниковым изображениям ночных огней // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2011. Т. 8, №1. С. 83 – 89.
3. Элвидж К. и др. Детектирование источников горения в реальном времени со спутника Suomi NPP с помощью сенсоров VIIRS, ATMS и CrIS // Тезисы докладов десятой Всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». М., 2012. С. 136.
4. Грибанов К. Г. и др. Метод определения расхода попутного газа на факелах по данным спутникового зондирования сенсорами типа MODIS в ИК каналах // *Оптика атмосферы и океана*. 2007. Т. 20, №1. С. 68 – 72.
5. Рапута В. Ф., Евтюшкин А. В. Экспериментальные исследования и численный анализ изменений химического состава хвои деревьев в окрестностях нефтегазовых факелов // *Обратные задачи и информационные технологии рационального природопользования : материалы IV Научно-практической конференции*. Ханты-Мансийск, 2008. С. 167 – 171.
6. Брыксин В. М. и др. Оперативный мониторинг пожарной обстановки в технологических коридорах магистральных трубопроводов // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2008. Т. 5, №2. С. 438 – 443.
7. Брыксин В. М., Евтюшкин А. В., Алсынбаев К. С. Мониторинг факелов по сжиганию попутного газа на месторождениях Западной Сибири по данным



MODIS // Тезисы докладов девятой Всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». М., 2011. С. 78.

8. Брыксин В. М., Евтюшкин А. В., Козлов А. В. Распределенная база результатов мониторинга сжигаемого газа на основе данных MODIS // Материалы пятнадцатой конференции по математике «МАК-2012». Барнаул, 2012. С. 55–57.

9. Брыксин В. М., Козлов А. В. Разработка технологии публикации пространственных данных сверхбольших объемов с использованием открытых систем // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. 2013. №4. С. 140–147.

Об авторах

Камил Салихович Алсынбаев — канд. техн. наук, доц., зав. лаб., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград.

E-mail: KAlsynbaev@kantiana.ru

Виталий Михайлович Брыксин — канд. техн. наук, вед. науч. сотр., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград.

E-mail: VBryksin@kantiana.ru

Аркадий Викторович Евтюшкин — канд. физ.-мат. наук, доц., зав. лаб., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград.

E-mail: AYEvytyushkin@kantiana.ru

Геннадий Николаевич Ерохин — д-р физ.-мат. наук, проф., директор НИИ ПИИМГ, Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград.

E-mail: GErokhin@kantiana.ru

Антон Владимирович Козлов — зав. лаб., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград.

E-mail: AnKozlov@kantiana.ru

About the authors

Dr Kamil Alsynbaev — Ass. Prof., head of the laboratory, I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad.

E-mail: KAlsynbaev@kantiana.ru

Dr Vitaliy Bryksin — leading researcher, I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad.

E-mail: VBryksin@kantiana.ru

Dr Arkadi Yevtyshkin — Ass. Prof., head of the laboratory, I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad.

E-mail: AYEvytyushkin@kantiana.ru

Prof Gennady Erokhin — director of research institute, I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad.

E-mail: GErokhin@kantiana.ru

Anton Kozlov — head of the laboratory, I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad.

E-mail: AnKozlov@kantiana.ru