

# Использование данных ДЗЗ для мониторинга добычи углеводородов

М.Н. Жижин, К. Элвидж, А.А. Пойда, А.И. Годунов, В.Е. Велихов, Г.Н. Ерохин, К.С. Алсынбаев, В.М. Брыксин

**Аннотация.** В статье предложен подход и алгоритмы для детектирования и оценки объемов сжигания попутного нефтяного газа на факельных установках по данным спутников OLS DMSP и MODIS, и оценки температуры и площади поверхности горения по мультиспектральным изображениям в коротковолновом ИК- и видимом диапазонах с сенсора VIIRS американского спутника Suomi NPP.

**Ключевые слова:** дистанционное зондирование, ночные огни, инфракрасные источники горения, газовые факелы.

## 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 нефтяного газа (ПНГ) 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 НОАА США, в 2008 г. выбросы в атмосферу составили более 278 млн. т эквивалента двуоксида углерода CO<sub>2</sub> [1]. Сжигание ПНГ приобретает особую остроту в аспекте проблемы глобального изменения климата и влияния антропогенных выбросов парниковых газов на повышение средней температуры планеты [2]. При этом основной проблемой по контролю сжигания газа является отсутствие возможности независимой проверки официальных отчетов стран и отдельных нефтяных компаний.

В статье предложены подходы и алгоритмы для детектирования и оценки объемов сжигания попутного нефтяного газа на факельных установках (ФУ) по данным американских

спутников DMSP (видимый диапазон, сенсор OLS) и Terra/Aqua (видимый и ИК диапазон, сенсор MODIS), а также для детектирования, оценки температуры и размера газовых факелов и других источников горения по мультиспектральным изображениям, полученных с американского спутника Suomi NPP (видимый и ИК диапазоны, радиометр VIIRS).

Качество спутниковых данных, используемых в исследовании, сильно отличается по времени, включая такие параметры, как интервал времени между повторными наблюдениями, число диапазонов, чувствительность и пространственное разрешение сенсоров. Это связано в первую очередь с технологическим прогрессом в области методов дистанционного зондирования. С другой стороны, времена жизни трех поколений спутников перекрываются и вместе составляют более 20 лет, что при условии взаимной калибровки измерений делает возможным анализ долгосрочных трендов и, в частности, региональных оценок динамики добычи и эффективности мер по снижению объемов сжигания ПНГ.

Интервалы времени доступных наблюдений Земли из космоса сенсорами OLS DMPS, MODIS Terra/Aqua и VIIRS S-NPP и основные параметры сенсоров сведены в Табл. 1.

Табл. 1. Основные параметры спутниковых платформ, использованных в исследовании

Спутник / сенсор	DMSP / OLS	Terra-Aqua / MODIS	Suomi NPP / VIIRS
Интервал времени доступных наблюдений	1992 – 2012 гг.	1999 – 2014 гг.	2012 – 2014 гг.
Интервал времени между повторными наблюдениями	24 ч	от 24 до 48 ч	24 ч
Время суток	ночь	день	ночь
Динамический диапазон (число уровней квантования)	6 бит	12 бит	14 бит
Пространственное разрешение (крупность)	2 км	1 км	742 м
Используемые диапазоны	1 диапазон в видимом спектре	3 диапазона в ИК спектре	1 диапазон в видимом, 8 диапазонов в ИК спектре
Время интеграции данных	1 год	1 год	1 день – 1 год

Как видно из таблицы, пространственное разрешение, динамический диапазон и спектральный диапазон сенсоров возросли за это время многократно. Это позволило расширить возможности дистанционного зондирования объемов сжигания ПНГ с оценок страна/год для спутников DMSP за период с 1992 по 2012 гг. до факел/месяц для спутника Suomi NPP в период с 2012 г. по настоящее время.

## 1. Использование данных спутника OLS DMSP для мониторинга сжигания ПНГ в мире и оценки объемов сжигания ПНГ

### 1.1. Ежегодные карты ночных огней

Оперативная система линейного сканирования OLS на спутниках DMSP была создана для получения изображений облаков в дневное и ночное время, используя два широкополосных сенсора в видимом и инфракрасном спектре. На солнечно-синхронных орбитах могут находиться до четырех спутников DMSP, одновременно наблюдая Землю днем, вечером, ночью и утром. Благодаря полосе охвата шириной 3000 км, каждый спутник DMSP способен собрать полный набор изображений поверхности Земли дважды в день. Ночью сигнал в видимом диапазоне спектра усиливается с помощью фотоумножителя, чтобы обеспечить

возможность обнаружения облаков, подсвечиваемых лунным светом. Высокий коэффициент усиления прибора позволяет детектировать ночные огни на Земной поверхности. Ночные огни стабильно излучаются поселениями человека. На их фоне заметны эфемерные огни от пожаров и рыболовных судов. Газовые факелы также видны со спутников DMSP и могут быть легко идентифицированы, когда они располагаются в море или в удаленных районах, где нет влияния городского света.

Данные, полученные с ночной стороны орбиты спутников DMSP, были обработаны алгоритмом, автоматически удаляющим зашумленные части изображений (ошибки в канале передачи, солнечные блики в оптической системе, грозовые молнии, полярные сияния, ночные огни и облака). Затем наблюдения, удовлетворяющие критериям качества, добавляются в глобальную карту-сетку. Размер ячейки сетки приблизительно равен квадратному километру на экваторе. Одновременно подсчитывается общее количество наблюдений в каждой ячейке, а среди них – количество орбит, свободных от облаков. В типичном композитном годовом изображении без облаков большинство областей имеют от двадцати до ста безоблачных наблюдений (Рис. 1), среди которых содержатся наблюдения ночных огней, в частности, свечение от газовых факелов.

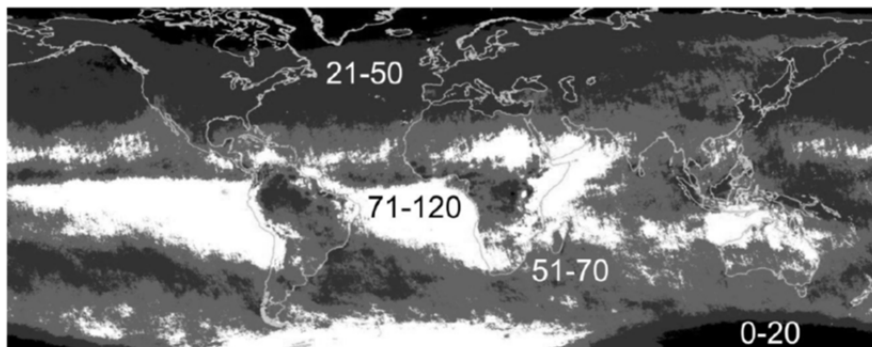


Рис. 1. Статистика безоблачных орбит с ночными изображениями Земли для спутника DMSP F16, полученных в 2004 году

Изображения ночных огней со спутников DMSP используются для анализа горения газовых факелов в виде усредненных цифровых значений, полученных с датчиков видимого спектра (DN) в безоблачную погоду, умноженных на частоту обнаружения свечения. Датчик DN имеет шестибитный АЦП, поэтому диапазон допустимых значений яркости изображения OLS составляет 0-63. Учет частоты обнаружения факела позволяет нормировать данные для факелов с различным графиком сжигания газа. Например, значение для яркости газового факела, обнаруженного только в половине случаев, уменьшается на 50%. Такие значения для ночных огней будем именовать "индексом яркости". Анализ светимости газовых факелов основывается на изображениях, построенных таким способом и конвертированных в проекцию Mollweide с размером ячеек сетки, эквивалентному квадратному километру (Рис. 2). Анализ интенсивности горения проводится на основе суммы индексов яркости, больших или

равных 8,0, для всех ячеек сетки, географически связанных с местоположением газовых факелов. Ячейки сетки, имеющие значения яркостей меньше 8, игнорируются для устранения фонового шума.

В ходе исследования был обработан набор годовых композитных снимков, полученных каждым из спутников, собиравших данные по ночным огням в период с 1994 по 2008 года (Табл. 2). Со временем спутники смещаются с орбиты день-ночь и их сенсоры теряют чувствительность. Чтобы обеспечить непрерывность наблюдений, на орбите заранее размещают дублирующие спутники. Таким образом, в течение многих лет получается отдельные композитные изображения ночных огней с двух спутников. После взаимного согласования по яркости, ежегодные композитные изображения использовались для оценки объемов сжигания ПНГ. Ранняя часть архива DMSP (1992-1994) пока не согласована по яркости с более поздними данными.



Рис. 2. Карта-сетка с изображением ночных огней в проекции Mollweide, полученная со спутника DMSP F16 в 2004 году

Табл. 2. Композитные изображения со спутников DMSP из архива NGDC

Год	Спутник				
1994	F12				
1995	F12				
1996	F12				
1997	F12	F14			
1998	F12	F14			
1999	F12	F14			
2000		F14	F15		
2001		F14	F15		
2002		F14	F15		
2003		F14	F15		
2004			F15	F16	
2005			F15	F16	
2006			F15	F16	
2007			F15	F16	
2008				F16	
2009				F16	F18
2010					F18
2011					F18
2012					F18

### 1.2. Калибровка изображений

Система OLS на спутниках DMSP не имеет встроенной калибровки яркости, поэтому отдельные композитные изображения были откалиброваны с помощью эмпирической процедуры. При анализе данных было установлено, что данные, полученные в 1999 году со спутника F12, имеют самые высокие числовые значения (чувствительность), и поэтому изображение F121999 было использовано в качестве опорного, а данные со всех остальных спутников были скорректированы в соответствии с ним.

Из всех рассмотренных областей, Сицилия имеет наиболее предпочтительные характеристики - равномерное распределение данных по всему динамическому диапазону и малые изменения в городской инфраструктуре за исследуемый период времени. В Табл. 3 представлены данные по полиномиальным моделям регрессий для композитного изображения по годам и спутникам относительно 1999 г. и спутника F12.

Признаком успешной калибровки служит близость значений в те годы, когда имеется два изображения с разных спутников. В большинстве случаев калибровка дала существенное сближение изображений. На Рис. 3 показаны откалиброванные оценки сжигания газа в Алжире. Тем не менее, не редко присутствуют расхождения для одного или двух годов из пятнадцати. В качестве примера, на рисунке в 2002

и 2003 годах значение для F14 ниже, чем для F15. В ходе рассмотрения данных по шестидесяти странам, явной закономерности в отклонении значений не наблюдалось. Отсутствие полного совпадения может быть вызвано периодическими суточными изменениями интенсивности горения факелов, в то время как время пролета разных спутников DMSP над объектом может различаться на два часа.

### 1.3. Оценка суммарных объемов сжигания газа

Газовые факелы были визуально идентифицированы на изображениях ночных огней. Ниже приведены три главные отличительные черты газовых факелов, использовавшиеся для их идентификации:

1. Изображения газовых факелов представляют собой очень яркие точечные источники света, они имеют тенденцию приобретать округлую форму с ярким центром и широкими краями.

Табл. 3. Данные по полиномиальным моделям регрессий для межгодовой калибровки композитных изображений DMSP

$$\text{Яркость\_откалиброванная} = C_0 + C_1 \times \text{Яркость} + C_2 \times \text{Яркость}^2$$

Спутник	Год	C <sub>0</sub>	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	R <sup>2</sup>	Number
F12	1994	0.1651	1.1244	-0.0018	0.915	38755
F12	1995	0.4103	1.2116	-0.0035	0.937	38795
F12	1996	0.2228	1.2700	-0.0040	0.944	39035
F12	1997	-0.0008	1.1651	-0.0023	0.945	39571
F12	1998	0.1535	1.0451	-0.0009	0.956	39791
F12	1999	0	1	0	1	42730
F14	1997	0.0291	0.0291	-0.0103	0.941	37871
F14	1998	0.1831	0.1831	-0.0096	0.972	37636
F14	1999	-0.1674	-0.1674	-0.0078	0.971	38744
F14	2000	0.1061	0.1061	-0.0059	0.972	37769
F14	2001	-0.2595	-0.2595	-0.0053	0.963	39389
F14	2002	0.4486	0.4486	-0.0035	0.927	38720
F14	2003	-0.2786	-0.2768	-0.0044	0.938	40050
F15	2000	0.1029	0.1029	-0.0010	0.970	39373
F15	2001	-0.4365	-0.4365	-0.0009	-0.959	40136
F15	2002	-0.2173	-0.2173	0.0008	0.966	40263
F15	2003	-0.2244	-0.2244	-0.0079	0.936	38708
F15	2004	-0.3657	-0.3657	-0.0056	0.948	39459
F15	2005	-0.6201	-0.6201	-0.0049	0.934	39915
F15	2006	-0.6005	-0.6005	-0.0049	0.939	39910
F15	2007	-0.1615	-0.1615	-0.0054	0.947	38968
F15	2008	0.5031	0.5031	0.0004	0.920	38236
F16	2004	-0.4436	-0.4436	-0.0030	0.950	39711
F16	2005	-0.2375	-0.2375	-0.0063	0.937	38856
F16	2006	0.0287	0.0287	-0.0013	0.938	38416
F16	2007	0.3210	0.3210	0.0013	0.949	39478
F16	2008	-0.1203	-0.1203	-0.0001	0.946	39975

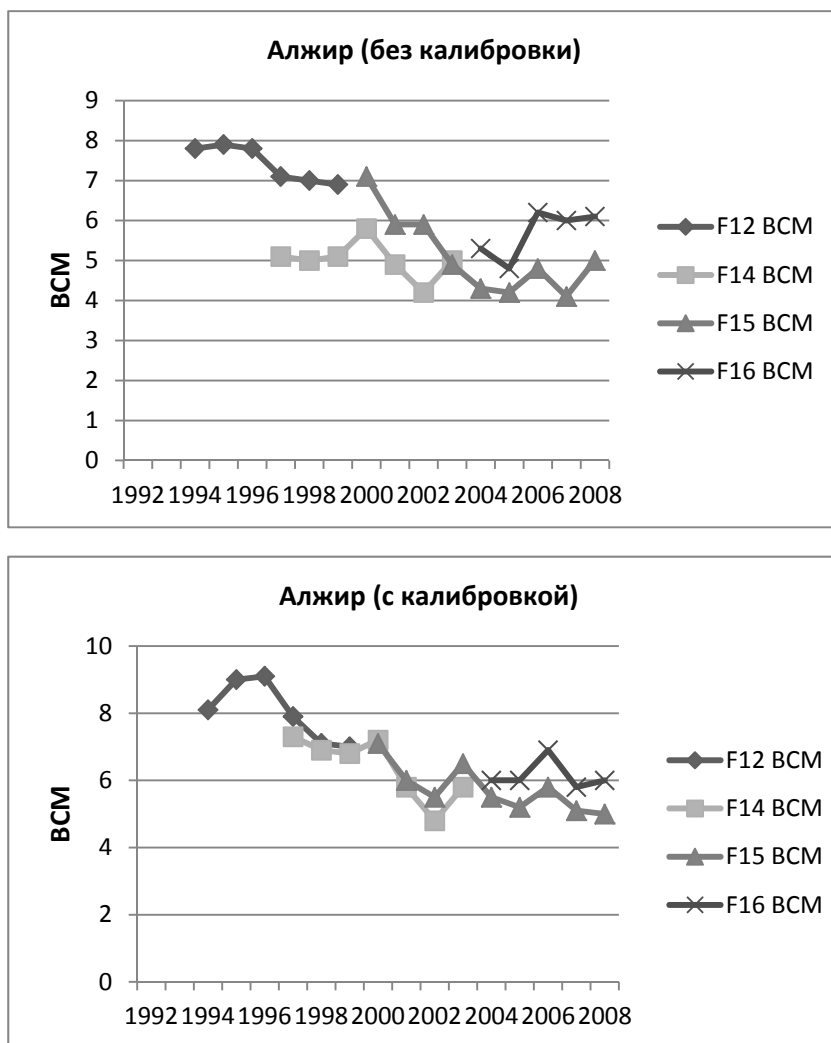


Рис. 3. Оценка объемов сжигания газа в Алжире с межгодовой калибровкой и без нее

2. Большинство газовых факелов активны в течение длительного периода, равного годам; также встречаются факелы, имеющие небольшие изменения интенсивности на протяжении целого десятилетия.

3. Газовые факелы обычно расположены в отдаленной местности, вдали от городских центров. Например, их легко обнаружить в открытом море.

4. Каждая область-кандидат на газовый факел была визуально проверена на снимках высокого разрешения, доступных в Google Earth. Во многих случаях было возможно обнаружить скопления факелов и ямы для сжигания попутного газа (Рис. 4). На изображениях Google Earth было отмечено приблизительно 2500 газовых факелов.

Для оценки объемов сжигаемого газа была исследована зависимость между суммой интенсивностей свечения и отчетными данными по объемам сожженного газа для отдельных стран в целом, а также для индивидуальных факелов (Рис. 5). Были рассмотрены все доступные данные по объемам сожженного газа, полученные от сообщества GGFR, начиная с 2004 г. Основываясь на визуальном анализе точечного графика зависимости суммы интенсивностей свечения ночных огней от объем сожженного газа в BCM (млрд. куб. м), данные по России были исключены из материала обучения.

Каждый факел, для которого имеются отчетные данные, был визуально проверен на DMSP-изображениях, а также на Google Earth. Если факелы располагались слишком близко друг



Рис. 4. Пример газовых факелов, найденных на изображениях высокого разрешения, доступных на сервисе Google Earth

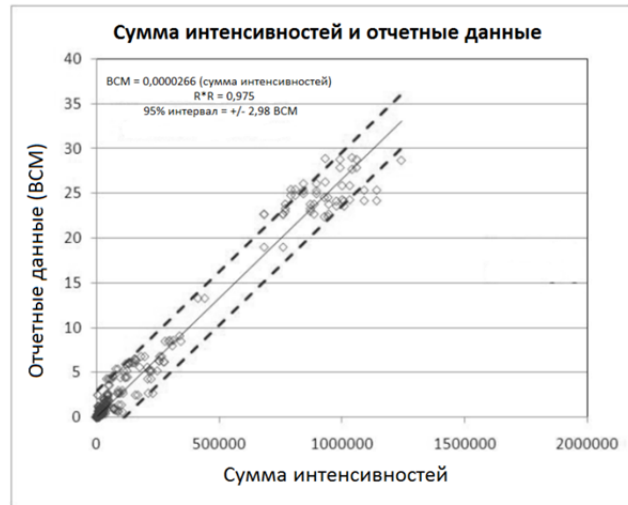


Рис. 5. График зависимости между объемом сжигаемого попутного газа (млрд. куб. м) и суммарной интенсивностью свечения ночных огней в области

доверительный интервал 95% обозначен пунктирной линией

к другу, то они изолировались от окружения, а затем объединялись в одну группу, при этом соответствующие факелы из отчетов также объединялись в одну группу. Факелы, расположенные в эксклюзивных экономических зонах, рассматривались отдельно, чтобы гарантировать корректность предоставленных по ним данных. Далее была выбрана линейная модель регрессии, проходящая через ноль. Полученное уравнение регрессии:  $BCM = 0.0000266 * SOL$ , где BCM – суммарный объем сжигания ПНГ в млн. куб. м (Billion Cubic Meter), а SOL (Sum Of

Lights index) – суммарная интенсивность свечения газовых факелов. Коэффициент детерминации  $R^2$  оказался равным 0,976.

#### 1.4. Оценки объемов сжигаемого газа год по странам

Объемы сожженного газа были оценены для разных стран в отдельности, основываясь на суммарных значениях интенсивности свечения ночных огней. Оценки для топ-20 стран за 2008 год представлены на Рис. 6 в виде столбчатого графика. На нем видно, что основное коли-



Рис.6. Оценки для топ-20 стран, сжигающих попутный газ, за 2008 год



Рис. 7. Всемирные объемы сжигания газа в промежутке от 140 до 170 ВСМ в период с 1994 по 2008 год  
В 2005-м году был пик в 172 ВСМ, а затем наблюдалось понижение

чество попутного газа сжигают всего несколько нефтедобывающих стран. Россия имеет наибольший показатель сжигания газа в 40 ВСМ в 2008 году, следуя перед Нигерией с показателем в 15 ВСМ. Вместе Россия и Нигерия сожгли 40% газа от общего объема по миру, а все страны из топ-20 - 85%.

На Рис. 7 представлена тенденция мировых объемов сжигания газа в период времени с 1994 по 2008 год. В 2005 году оценки показывают небольшой пик, а после этого наблюдается монотонное понижение. Данные DMSР показывают, что в целом по миру объем сжигаемого газа понизился на 19% после 2005 года с 172 до 139 ВСМ. Анализируя национальные тренды, выделяется локальное рекордное значение в двух сегментах, разделенных пиком в 2005-м году. В раннем сегменте (1994-2005 гг.) можно выделить четыре категории: «понижение», «пик в середине», «стабильное горение» и «повышение».

Семнадцать стран имеют возрастающий тренд сжигания газа в период с 1994 по 2005 год. В эти страны входят: Азербайджан, Чад, Китай, Экваториальная Гвинея, Гана, Ирак, Казахстан, Мьянма, Оман, Катар, Россия, Южная Африка, Судан, Таиланд, Туркменистан, Узбекистан и Йемен. На Рис. 8 представлены данные для России и Казахстана.

Оценки мирового уровня сжигания газа свидетельствуют о том, что понижение активности сжигания газа присутствует в каждом году после 2005-го. Сравнивая три страны с наибольшим понижением объемов сжигания газа с тремя странами с наибольшим увеличением (Рис. 9), можно видеть, что Россия и Нигерия

понижили объем сжигания газа на 18,5 и 6,5 ВСМ соответственно, следуя перед Анголой с показателем уменьшения в 1,8 ВСМ. Суммарное понижение сжигания газа Россией и Нигерией составляет 75% от общего мирового понижения в период с 2005 по 2008 год.

## 2. Использование данных сенсора MODIS для оценки объемов сжигания ПНГ

Авторами данной статьи в 2004-2006 годах совместно с исследователями Уральского государственного университета был предпринят подход для оценки мощности ФУ на основе тепловых каналов сенсора MODIS, в частности, путем измерений яркости свечения ФУ (в канале 20) [3]. Методика впервые была апробирована на анализе данных по ФУ на Ван-Еганском месторождении в Ханты-Мансийском автономном округе-Югре (ХМАО-Югре). Для данной факельной установки у авторов методики имелись показания системы оперативного учета газа (комплекс датчиков, вычислительное устройство и программное обеспечение RL101 RocLink фирмы Fisher-Rosemount Europes), установленной на центральном пункте сбора месторождения. На снимках MODIS августа 2004 года была проведена калибровка методики оценки мощности ФУ по летним снимкам. Методика предполагает учет яркости пикселя, соответствующего площадке (размером порядка 1 км на 1 км для центральной полосы снимка и до 1 км на 4 км для краев снимка), содержащей ФУ, и яркостей фоновых точек в формуле

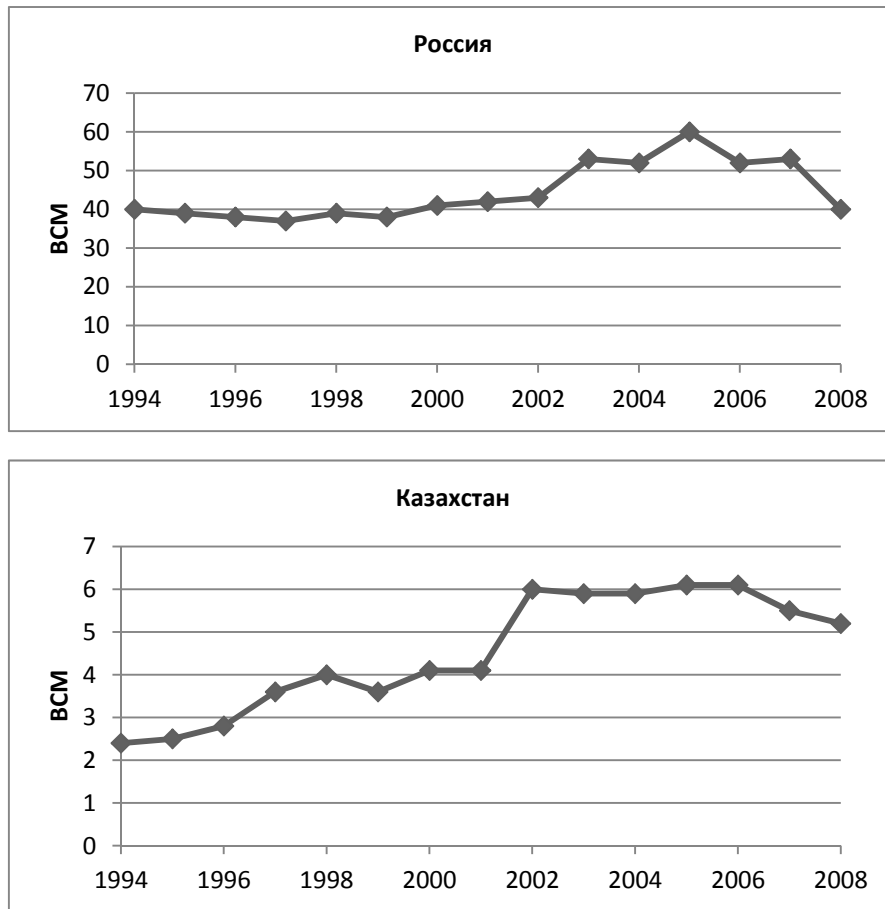


Рис. 8. Россия и Казахстан - две из семнадцати стран, где объемы сжигания попутного газа увеличиваются в период с 1994 по 2005 год. Сжигание газа уменьшается во всех трех странах с 2005 по 2008 год

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

где  $R_\lambda$  – спектральная плотность энергетической яркости пучка излучения, приходящего с поверхности пикселя MODIS площадью  $S_{pix}$ ,  $\theta$  – зенитный угол спутника,  $C$  – удельная теплота сгорания попутного газа,  $Q$  – расход подаваемого газа в тысячах  $m^3$  в час,  $F_\lambda$  – плотность распределения энергии излучения факела по спектру. Величина  $F_\lambda$  подбиралась, исходя из известных значений мощности экспериментальной ФУ в качестве подгоночного модельного коэффициента.  $R_\lambda^0$  является средней спектральной плотностью фоновых точек в окрестности факела. Важной особенностью методики является 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 ( $R_\lambda$ ) в условиях изменчивых значений прозрачности атмосферы и освещенности.

На этапе исследований 2011-2012 годов стояли задачи модификации методики для распространения на другие ФУ ХМАО-Югры, представляющей пилотную территорию исследований, и создания программного обеспечения (ПО) для автоматической обработки большого объема данных. Для осуществления этих задач был использован имеющийся фактографический материал: отчетные данные недропользо-



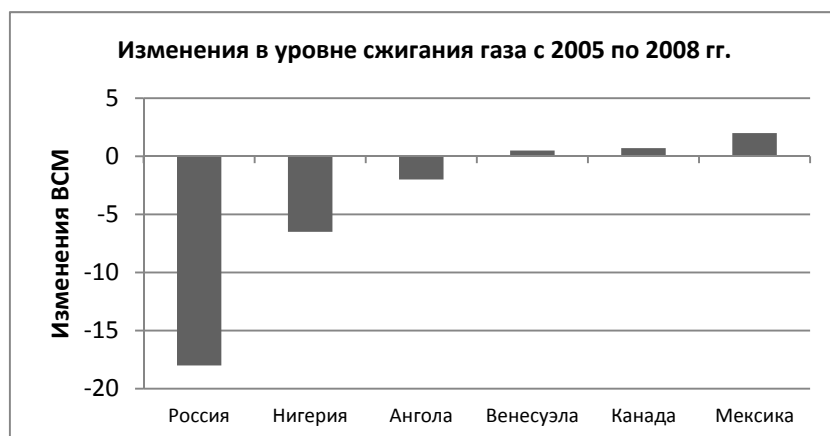


Рис. 9. Сравнение изменений в уровне сжигания газа с 2005 по 2008 год для топа трех стран, его понижающих (Россия, Нигерия, Ангола), в противопоставлении с топом трех стран, его увеличивающих (Венесуэла, Канада и Мексика)

вателей 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. На основе анализа космоснимков и картографических материалов дешифрованы несколько сотен ФУ и группы близко расположенных ФУ (ГФУ), с точностью геопривязки от 10 до 50 метров. В окрестностях всех ФУ подобраны точки-претенденты 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. Геобаза позволила проводить интегрировать расчетные данные по лицензионным участкам и совместный анализ расчетных и отчетных данных [4,5,6].

В связи с тем, что при разработке формулы (1) были допущены определенные упрощения, была проведена дополнительная калибровка модели на серии снимков радиометра MODIS, содержащих ФУ высокого давления, причем на моменты съемки имелись почасовые данные расходомеров. Модифицирован алгоритм расчета для конкретной ФУ, при которой учитывался уровень плотности не одного пикселя, а группы пикселей в зоне ФУ. Для устранения проблемы неточности геопространственной привязки была разработана методика автомати-

ческой привязки снимков по заранее выбранному наиболее ярким ФУ.

Поскольку мгновенный расход газа в ФУ в момент регистрации сенсором MODIS неизвестен, а в распоряжении имелись только среднечасовые измерения, возникали погрешности в расчетах. Наличие несоответствие потребовало введения некоторой корректирующей регрессионной модели:

$$Q^* = \begin{cases} 0.5937 \cdot Q + 5.1339, & \text{при } Q < 150 \\ 31.823 \cdot \ln Q - 68.321, & \text{при } Q \geq 150 \end{cases} \quad (2)$$

где  $Q^*$  – скорректированное значение расхода подаваемого газа в тысячах  $\text{м}^3$  в час

Коэффициент корреляции для линейной модели составил 0.82, для логарифмической модели – 0.76. Общее эмпирическое корреляционное отношение составило 0.9. Суммарный расход за рассматриваемый период составил 62983 тыс.  $\text{м}^3$ , а расчетный – 62663 тыс.  $\text{м}^3$ , т.е. точность расчета составила для тестовой ФУ в заданный промежуток времени составила 99.5%.

На основе разработанной методики было создано ПО и обработаны данные для ХМАО-Югры. 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. Таким образом, были отобраны 17 лицензионных участков. Проведенные расчеты показали, что эмпирический коэффициент корреляция между расчетными и отчетными данными равен 0.96.

Было обработано 11056 снимков MODIS за 2003-2011 гг. до уровня 2А общим объемом более 6 ТБ и получено 446012 расчетных значений мощности горения для различных ФУ пилотной территории. На основании проведенных расчетов, были получены контрольные расчетные значения годовых объемов для отобранных 17 лицензионных участков. Проведенное сравнение для этих лицензионных участков показало, что превышение расчетных данных по сравнению с отчетными сведениями недропользователей на пилотном участке составляет до 2 раз. Как видно из представленной на Рис. 10 диаграммы, в целом наблюдается тенденция постепенного снижения объемов сжигания ПНГ с пиком в 2005 году, что соответствует оценкам полученным другими способами.

### 3. Перспектива использования радиометра VIIRS со спутника Suomi NPP для мониторинга сжигания ПНГ

#### 3.1. Детектирование инфракрасных источников по данным сенсора VIIRS

Мультиспектральные изображения ночных огней в видимом и коротковолновом инфракрасном (SWIR) спектрах, получаемые с сенсора VIIRS нового американского спутника Suomi NPP, запущенного на орбиту в ноябре 2011 г., позволяют поднять на новый уровень технологию детектирования инфракрасных источников на поверхности Земли, таких как лесные пожары, газовые факелы, сталелитейные печи или активные вулканы.

Ограниченный набор инфракрасных каналов на предыдущих спутниках, включая AVHRR радиометр на спутниках NOAA POES или MODIS радиометр на спутниках NASA Aqua и Terra, а также необходимость детектирования относительно низкотемпературных лесных пожаров (<1000K) как ночью, так и в дневное время, приводило к широкому использованию одно- и двухканальных методов детектирования ИК источников. В их основе лежит метод, предложенный в работах Dozier в 1981 г. [7, 8] и реализованный в детекторе лесных пожаров по данным радиометра MODIS [9]. К сожалению, одно- и двухканальные алгоритмы не позволяют с достаточной точностью определять температуру горячих ИК источников (>1400K), к которым относятся

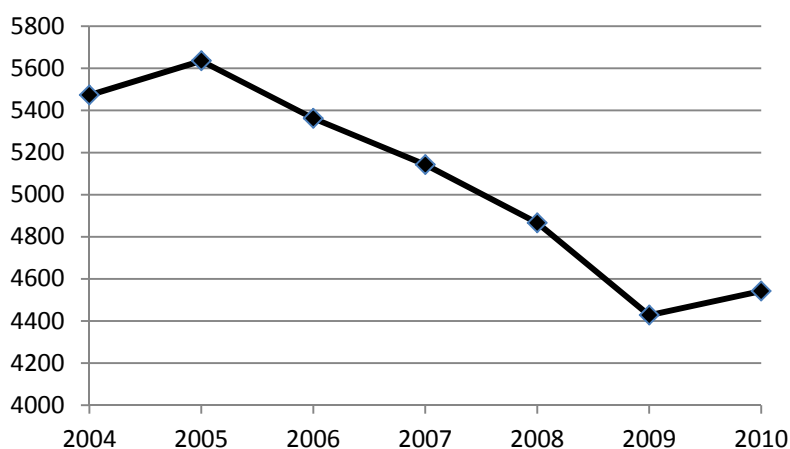


Рис. 10. Суммарный расчетный объем сжигания ПНГ в млн. м<sup>3</sup> в год по 17 лицензионным участкам за 2004-2010 гг.

газовые факелы и температура которых лежит на краю полосы пропускания ИК каналов, используемых в этом детекторе.

Полосы пропускания инфракрасных каналов среднего разрешения (т.н. М-каналов) радиометра VIIRS, передающих данные в ночное время, представлены в Табл. 4. В ночное время на радиометре VIIRS задействовано меньше каналов, чем в дневное, что связано с ограничениями пропускной способности канала данных. Тем не менее, сравнение спектральных характеристик каналов VIIRS, доступных в ночное время, с планковской кривой излучения абсолютно черного тела с температурой поверхности 2223 К (температура горения метана) (Рис. 11) позволяет заключить, что полоса пропускания канала M10 с длиной волны 1,6 мкм оптимальна для детектирования газовых факелов.

Формула Планка определяет зависимость спектральной плотности мощности излучения абсолютно чёрного тела заданной температуры от длины волны:

$$R(\lambda, T) = \varepsilon \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda k_B T}} - 1}$$

где  $R$  – спектральная плотность мощности излучения ( $\text{В}/\text{м}^2/\text{ср.}/\text{мкм}$ ),  $T$  – абсолютная температура черного тела (К),  $\lambda$  – длина волны (мкм),  $h$  – постоянная Планка, и  $\varepsilon$  – масштабный множитель, компенсирующий отраженное излучение «серого» тела и геометрию излучателя.

Мультиспектральный детектор ИК источников по данным радиометра VIIRS работает по следующему принципу:

1. Определить «горячие» пиксели (превышение сигнала над шумом по правилу N-сигм) в ИК диапазоне M10 и выделить в них локальные максимумы с учетом геометрических искажений изображения в проекции спутника.
2. Повторить поиск «горячих» пикселей в соседних ИК-диапазонах M7 и M8.
3. Провести локальный поиск «горячих» пикселей в диапазонах M12 и M13 (оценка уровня шума в этих диапазонах делается в ло-

Табл. 4. Инфракрасные каналы среднего разрешения радиометра VIIRS

Диапазон VIIRS	Центральная длина волны (мкм)	Диапазон частот (мкм)	Диапазон длин волн (мкм)	Тип диапазона
DNB	0,7	0,4	0,5-0,9	Видимый
M7	0,865	0,039	0,846-0,885	NIR
M8	1,24	0,02	1,23-1,25	SWIR
M10	1,61	0,06	1,58-1,64	
M12	3,7	0,18	3,61-3,79	MWIR
M13	4,05	0,155	3,97-4,13	
M14	8,55	0,3	8,4-8,7	LWIR
M15	10,763	1,0	10,26-11,26	
M16	12,013	0,95	11,54-12,49	

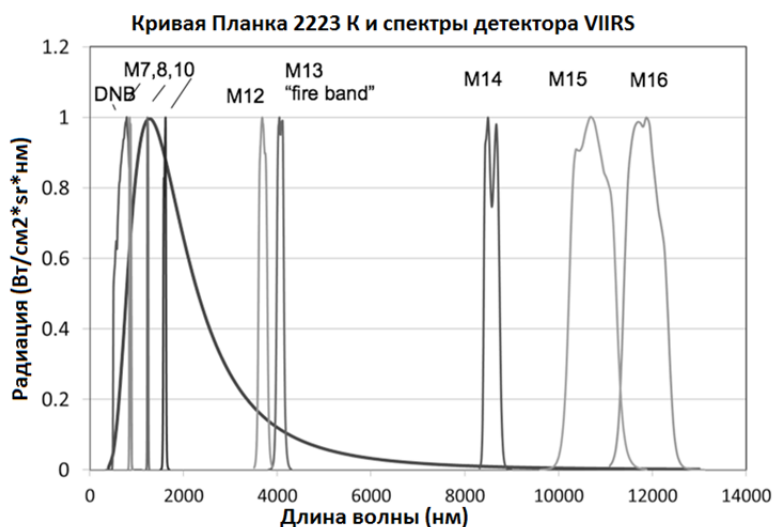


Рис. 11. Сравнения планковской кривой для черного тела с температурой 2223 К со спектральными характеристиками «ночных» ИК каналов радиометра VIIRS

кальной окрестности «горячих» пикселей из канала M10, а не по всему изображению).

4. Результатом детектирования являются пиксели, для которых уровень сигнала превышает шум хотя бы в одном канале в дополнение к каналу M10.

Полученные в результате яркости ИК источника в нескольких спектральных каналах далее используются для субпиксельной оценки его температуры, энергии и размера (площади). Для этого производится нелинейный поиск оптимальных значений температуры  $T$  и масштабного множителя  $\epsilon$  с тем, чтобы сумма квадратов разностей яркостей, оцененных по формуле Планка, и измеренных в каналах со значимым превышением сигнала над шумом была минимальной. Зная значение масштабного множителя  $\epsilon$ , можно оценить площадь очага горения, умножив его площадь (footprint) пикселя на местности. Энергию излучения ИК источника можно оценить по закону Стефана-Больцмана

$$I(T) = P(T)/A = \int_0^\infty R(\lambda, T) d\lambda \int d\Omega = \epsilon \sigma T^4$$

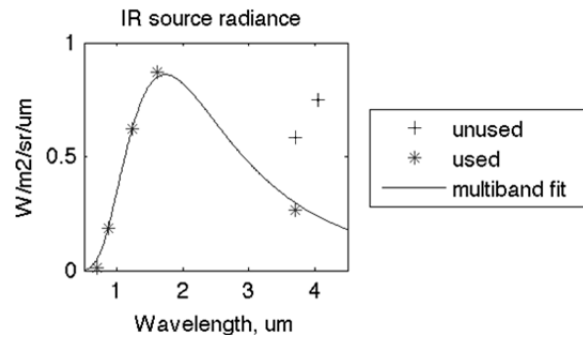


Рис. 12. Подгонка кривой Планка к наблюдаемым яркостям в M-каналах радиометра VIIRS спутника Suomi NPP

Пример нелинейной подгонки планковской кривой к наблюдаемым значениям яркости в M-каналах VIIRS показан на Рис. 12. На нем символом (\*) показаны значения яркости в каналах, где уровень сигнала в исследуемом пикселе выше уровня шума.

Пример детектирования газового факела в Персидском заливе приведен на Рис. 13. Точность определения координат факела составляет 400 м. По результатам многодневной апробации можно заключить, что алгоритм

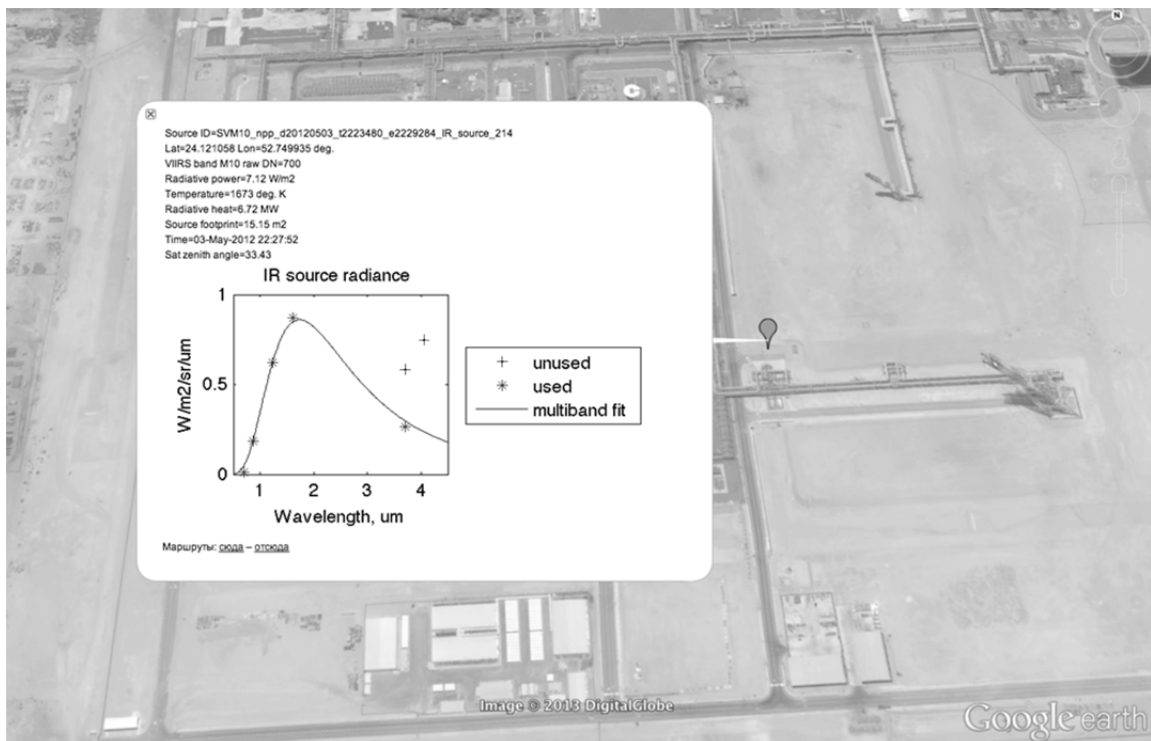


Рис. 13. Пример детектирования газового факела в Персидском заливе по данным радиометра VIIRS

Табл. 5. Легенда для карты детектирования ночных ИК источников

Размер символа	Энергия горения	Цвет символа	Температура
большой	$P(T) > 10 \text{ МВт}$	красный	$T > 1600 \text{ К}$
средний	$1 \text{ МВт} < P(T) < 10 \text{ МВт}$	желтый	$1400 \text{ К} < T < 1600 \text{ К}$
малый	$P(T) < 1 \text{ МВт}$	зеленый	$1200 \text{ К} < T < 1400 \text{ К}$
		синий	$1000 \text{ К} < T < 1200 \text{ К}$
		фиолетовый	$T < 1000 \text{ К}$

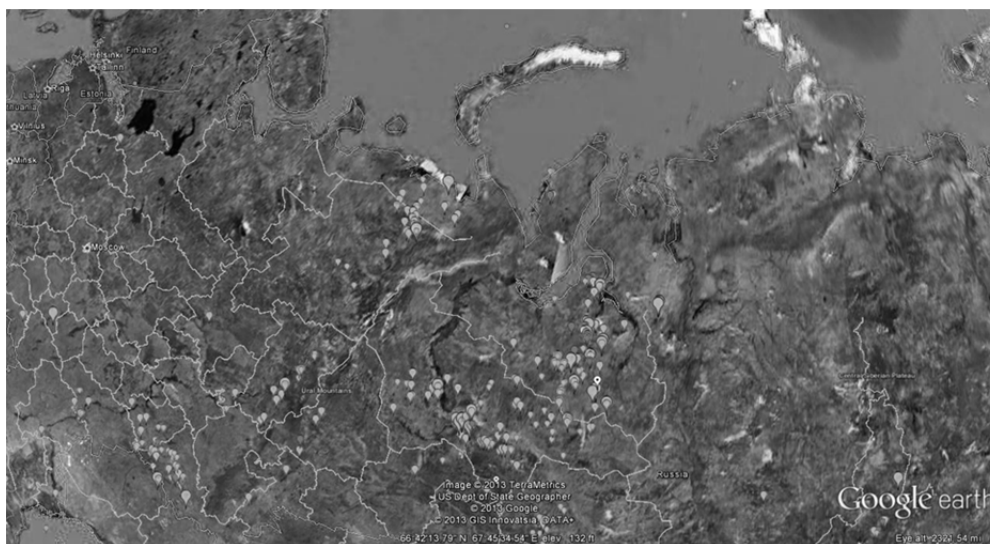


Рис. 14. Пример карты детектирования газовых факелов в Западной Сибири в ночь на 25 февраля 2013 г

чувствителен к наземным ИК источникам в диапазоне температур 400 – 2500 К размером от 0,5 до 1000 м<sup>2</sup>.

Картографическое представление результатов мультиспектрального детектирования газовых факелов по данным радиометра VIIRS реализовано с помощью отображения векторных файлов в формате KML с параметрами факелов на картографической основе Google Earth (или Google Maps). Положение факелов на карте показывается с помощью специальных символов, размер которых пропорционален энергии горения (объему сжигаемого газа), а цвет – температуре горения. Расшифровка цветов и размеров символов представлена в Табл. 5. На Рис. 14 представлен фрагмент карты с результатом детектирования факелов в Западной Сибири в ночь на 25 февраля 2013 г.

## 2.2 Автоматизированная очередь обработки спутниковых данных

Помимо проблем хранения спутниковых данных возникает проблема их обработки в реальном времени. Последовательное применение

всех алгоритмов, необходимых для получения конечного продукта, может занимать больше времени, чем полет самого спутника. В связи с этим возникает задача распараллеливания процесса обработки потока данных, получаемого со спутников ДЗЗ. При этом сам процесс обработки можно рассматривать как конвейер, так как технология передачи данных со спутника подразумевает разбиение передаваемых данных по времени, по типу сенсора и диапазону. Таким образом, на вход системе обработки данных подается последовательность (очередь) файлов в заданном формате (например, HDF), упорядоченная по времени и типу полученных данных, и задача обработки состоит в том, чтобы брать из этой последовательности отдельные файлы, запускать подзадачи их обработки на отдельных узлах вычислительного кластера, интегрировать получаемые промежуточные результаты в общий продукт (например, карту) и сервировать для дальнейшего использования. В дополнение к этому требуется контролировать всю цепочку выполнения процесса обработки с целью своевремен-

ного обнаружения ошибок и повторного запуска подзадач, а также равномерного их распределения по вычислительным ресурсам.

Для решения задачи обработки данных ДЗЗ была разработана параллельно-конвейерная система в инфраструктуре облачных вычислений, включающая модель MapReduce, очереди заданий, виртуальные вычислительные узлы и кластерную файловую систему.

Система ориентирована на обработку файлов — ключевую роль в рабочем потоке играют первичные данные ДЗЗ и результаты следующих этапов обработки, причем режим обработчиков (активность или ожидание) определяется наличием или отсутствием всех нужных файлов, а также состоянием таймеров или наличием запросов пользователя. Файлам приписываются атрибуты (например, имя сенсора, тип данных и т.п.), которые могут быть получены из имени файла или из метаданных его формата данных — например, заголовков NetCDF или HDF5 (форматы хранения климатических данных). Обработчики файлов задаются в командной строке исполнения либо определяются требуемыми ресурсами или приоритетом, но главное — зависят от описания входных и выходных файлов, условий их соответствия заданному конвейеру и взаимосвязей на уровнях файлов и других обработчиков. Каждое имя, условие или ограничение может быть представлено в виде шаблона и формализовано. Шаблоны позволяют формально представить группу задач, объединенных входными и выходными данными, различными ограничениями на данные и процесс исполнения, и служат для реализации обработки потока входных файлов. Конвейеры регистрируются в системе на основе шаблонов их описания, создают необходимое число обработчиков и начинают работу. При удовлетворении условий на входные файлы и с учетом взаимосвязей подзадач, обработчиками конвейеров создаются конкретные экземпляры задач, которые затем планировщиком распределяются по вычислительному кластеру.

В системе имеются средства динамической адаптации к нагрузкам и оптимизации путем запуска или останова виртуальных машин из библиотеки образов с предустановленным ПО, что позволяет обрабатывать данные в пределах

квот пользователя или проекта в облачной инфраструктуре. Обеспечение отказоустойчивости системы гарантируется за счет фиксации состояний — наличие точек восстановления, очередей обмена сообщений и задач, а также распределенной файловой системы позволяет повысить надежность системы.

Система построена на базе языка Python 2.7, распределенной файловой системы CEPH, системы низкоуровневой пакетной обработки задач на распределенных кластерах SLURM, СУБД MySQL для регистрации объектов и субъектов очереди (шаблонов, файлов, управляющих структур и т.п.) (с некоторыми исправлениями возможна поддержка PostgreSQL), системы обмена сообщениями RabbitMQ и ПО из OpenStack для реализации инфраструктуры класса IaaS.

## Заключение

Представленные в статье методы и алгоритмы могут быть использованы для оценки объемов сжигаемого ПНГ на основе архивов данных сенсора OLS DMSP, MODIS и VIIRS Suomi NPP по территориям лицензионных участков и сравнения их со стандартными формами отчетности недропользователей.

Предложенный в статье метод детектирования и оценки энергетических характеристик факелов сжигания попутного газа по мультиспектральным изображениям в видимом и ближнем ИК диапазонах 1,5-4 мкм с сенсора VIIRS американского спутника Suomi NPP, позволяет на порядок повысить чувствительность детектирования факелов в ночное время и получать в реальном времени оценки температуры и поверхности горения в диапазонах 500-1800 К и 1-1000 м<sup>2</sup> соответственно.

## Литература

1. Elvidge C., D. Ziskin, K. Baugh, B. Tuttle, T. Ghosh, D. Pack, E. Erwin and M. Zhizhin, A Fifteen Year Record of Global Natural Gas Flaring Derived from Satellite Data, *Energies* 2009, 2, 595-622; doi:10.3390/en20300595.
2. Gore A., *An Inconvenient Truth: The Planetary Emergency of Global Warming and What We Can Do About It*, Rodale Books, 2006, 328 pp.
3. Грибанов К.Г., Захаров В.И., Алсынбаев К.С. Суляев Я.С. Метод определения расхода попутного газа на факелах по данным спутникового зондирования сен-

- сорами типа MODIS в ИК каналах // Оптика атмосферы и океана. 2007. Т.20. №1. С.68-72
4. 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». - Москва, ИКИ РАН, 14-18 ноября 2011г. С.78.
  5. 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: Изд-во Алт. ун-та, 2012. С.55-57.
  6. Алсынбаев К.С., Брыксин В.М., Евтюшкин А.В., Ерохин Г.Н., Козлов А.В. Оценка мощности факельных установок по сжиганию попутного нефтяного газа на основе обработки космоснимков MODIS // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. 2013. № 10. С.131-137.
  7. Dozier, J. A Method for Satellite Identification of Surface Temperature Fields of Subpixel Resolution. REMOTE SENSING OF Environment, 1981, 11, 221-229.
  8. Matson, M.; Dozier, J. Identification of Subresolution High Temperature Sources Using a Thermal IR Sensor. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1981, 47, pp. 1311-1318.
  9. Justice, C.; Giglio, L.; Boschetti, L.; Roy, D.; Csiszar, I.; Morisette, J.; Kaufman, Y. MODIS Fire Products (Version 2.3, 1 October 2006). Algorithm Technical Background Document.

**Жижин Михаил Николаевич.** Ведущий научный сотрудник Института космических исследований РАН, Национальный центр геофизических данных НОАА США. Окончил Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова в 1984 году. Кандидат физико-математических наук. Автор 55 печатных работ. Область научных интересов: математическая геофизика, сейсмология, вулканология, глобальные изменения климата, космическая погода, геоинформатика, дистанционное зондирование Земли, суперкомпьютерные вычисления. E-mail: [jjn@wdcb.ru](mailto:jjn@wdcb.ru)

**Крис Элвидж.** Ведущий научный сотрудник Национального центра геофизических данных НОАА США. Окончил Стэнфордский университет в 1977 году. Доктор физико-математических наук. Автор 133 печатных работ. Область научных интересов: дистанционное зондирование Земли, экология, геология, ботаника. E-mail: [Chris.Elvidge@noaa.gov](mailto:Chris.Elvidge@noaa.gov)

**Пойда Алексей Анатольевич.** Начальник лаборатории Научно-исследовательского центра «Курчатовский институт». Окончил Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова в 2005 году. Кандидат физико-математических наук. Автор 19 печатных работ. Область научных интересов: геоинформационные системы; методы и системы интеллектуального анализа данных и распознавания образов; методы, средства, технологии и системы обработки, анализа и распознавания изображений и сигналов; высокопроизводительные компьютерные системы и распределенная обработка данных; обработка сверхбольших массивов данных и их визуализация. E-mail: [poyda@wdcb.ru](mailto:poyda@wdcb.ru)

**Годунов Александр Иванович.** Ведущий специалист НК "Роснефть". Окончил РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина в 2010 году. Автор 3 печатных работ. Область научных интересов: дистанционное зондирование Земли, анализ данных, математический анализ изображений. E-mail: [alex.i.godunov@gmail.com](mailto:alex.i.godunov@gmail.com)

**Велихов Василий Евгеньевич.** Заместитель директора по информационным технологиям и системам НИЦ «Курчатовский Институт». Окончил Московский физико-технический институт в 1983 году. Кандидат физико-математических наук. Автор 12 печатных работ. Область научных интересов: технологии распределенных и высокопроизводительных вычислений, компьютерное моделирование, обработка и анализ сверхбольших данных. E-mail: [Velikhov\\_ve@nrcki.ru](mailto:Velikhov_ve@nrcki.ru)

**Ерохин Геннадий Николаевич.** Директор НИИ прикладной информатики и математической геофизики Балтийского федерального университета им. И. Канта. Окончил Новосибирский государственный университет в 1970 году. Доктор физико-математических наук, профессор. Автор 125 печатных работ. Область научных интересов: математическая геофизика, некорректные задачи, геоинформатика, дистанционное зондирование Земли, суперкомпьютерные вычисления. E-mail: [GErokhin@kantiana.ru](mailto:GErokhin@kantiana.ru)

**Алсынбаев Камил Салихович.** Заведующий лабораторией НИИ прикладной информатики и математической геофизики Балтийского федерального университета им. И. Канта. Окончил Новосибирский государственный университет в 1973 году. Кандидат технических наук, доцент. Автор 93 печатных работ. Область научных интересов: геоинформатика, дистанционное зондирование Земли, вычислительная геометрия, информационные технологии. E-mail: [KAlsynbaev@kantiana.ru](mailto:KAlsynbaev@kantiana.ru)

**Брыксин Виталий Михайлович.** Ведущий научный сотрудник НИИ прикладной информатики и математической геофизики Балтийского федерального университета им. И. Канта. Окончил Алтайский государственный университет в 2001 году. Кандидат технических наук, доцент. Автор 94 печатных работ. Область научных интересов: математическое моделирование, геоинформатика, дистанционное зондирование Земли, геопорталы. E-mail: [VBryksin@kantiana.ru](mailto:VBryksin@kantiana.ru)