

УДК 504.06

Алгоритм детектирования факельных установок по сжиганию попутного нефтяного газа и оценка объемов выбросов вредных веществ

М.Н. Алексеева, И.Г. Яценко*

*Институт химии нефти СО РАН
634021, г. Томск, пр. Академический, 4*

Поступила в редакцию 18.01.2019 г.

Предложен автоматизированный алгоритм детектирования факельных установок на основе расчета температуры земной поверхности по космическим снимкам Landsat-8 двумя методами, включая расчет излучательной способности земной поверхности и уравнение, учитывающее содержание водяного пара в атмосфере. Разность между температурой земной поверхности, рассчитанной с помощью этих методов, и измеренными на метеостанциях температурами не превышает 2 °С. Выявлены две факельные установки на территориях месторождений в Томской обл. и в Ханты-Мансийском АО. Определено, что наибольшую часть выбросов в атмосферу при сжигании попутного нефтяного газа составляет оксид углерода.

Ключевые слова: температура земной поверхности, тепловые космические снимки Landsat-8, факельные установки, попутный нефтяной газ, загрязняющее вещество, атмосфера; temperature of the earth's surface, Landsat-8 thermal satellite images, flare units, associated petroleum gas, pollutant, atmosphere.

Введение

Человеческая деятельность является причиной роста концентрации парниковых газов в атмосфере. Парниковые газы – группа газов атмосферы, способных задерживать и поглощать инфракрасное (тепловое) излучение поверхности Земли, создавая таким образом парниковый эффект. Основной вклад в антропогенную эмиссию парниковых газов вносит диоксид углерода (углекислый газ, CO₂), доля которого в общей эмиссии превышает 75%. Более 80% всех выбросов CO₂ приходится на сжигание ископаемого топлива, в частности факельного сжигания попутного нефтяного газа (ПНГ) на нефтегазопромислах страны, и технологические процессы в промышленности [1].

В нефтегазодобывающих регионах России в процессе добычи и перегонки нефти при отсутствии необходимых для переработки ПНГ оборудования и инфраструктуры растворенный в нефти попутный газ сжигается, в результате чего в атмосферу выбрасывается большое количество вредных веществ. Количество сжигаемого в факелах газа ежегодно уменьшается, но уровень его полезного использования еще не достиг установленной государством нормы в 95%. Объем сожженного в факельных установках газа в России в 2016 г. превысил 12,3 млрд·м³, что оказалось на 1,8 млрд·м³ больше показателя предыдущего года [1].

Западная Сибирь – основной нефтегазодобывающий регион России, поэтому здесь самый высокий уровень извлечения ПНГ. Например, на долю Ханты-Мансийского автономного округа (ХМАО) приходится 43,7% общероссийской добычи нефти. За последние четыре года в ХМАО объем сжигаемого ПНГ уменьшился в среднем в 2,5 раза по сравнению с 2010–2014 гг. (рис. 1). В 2017 г. добыча попутного газа в автономном округе составила 35 млрд·м³, количество сжигаемого ПНГ – 4,5 млрд·м³, что эквивалентно 1,6% от его добычи [2].

В Томской обл. ситуация по утилизации ПНГ выглядит значительно хуже (рис. 2), что обуславливает высокие риски для окружающей среды в области [3, 4]. Так, в 2015 и 2016 гг. на месторождениях Томской обл. сжигалось 0,6 млрд·м³ ПНГ, что соответствовало 15% от его общей добычи. В 2017 г. при сокращении добычи ПНГ почти в 2 раза по сравнению с 2016 г. (1,7 млрд·м³) уровень его сжигания увеличился до 18% и составил 0,3 млрд·м³ [3].

В настоящее время в России существует проблема расхождения оценок объемов извлечения и использования ПНГ, связанная с недостатками или отсутствием автоматизированных систем его измерения и учета в процессе сепарации и сжигания на факельной установке (ФУ) [5]. Для решения этой проблемы представляется перспективным применение данных, полученных в ходе дистанционного зондирования Земли. Такие данные, в том числе космические снимки (КС), позволяют проводить мониторинг количества и режима работы ФУ, предварительно оценивать объемы сжигания ПНГ.

* Мария Николаевна Алексеева (amn@ipc.tsc.ru); Ирина Германовна Яценко (sric@ipc.tsc.ru).

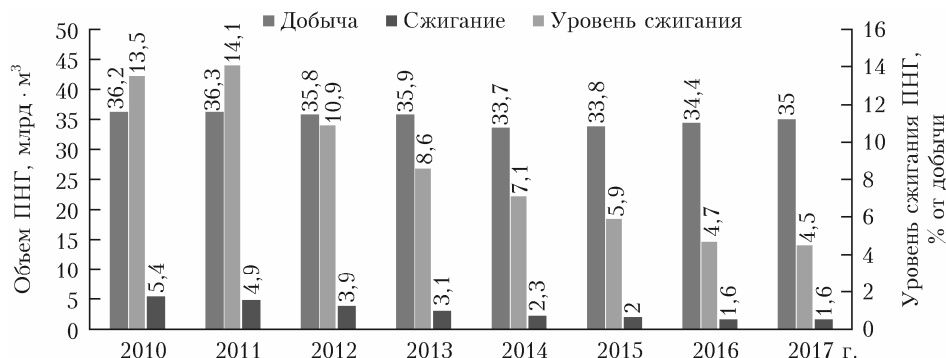


Рис. 1. Динамика добычи и сжигания ПНГ в ХМАО

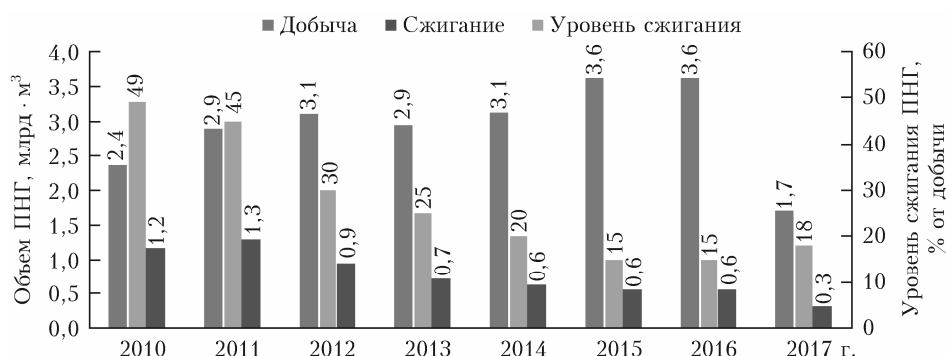


Рис. 2. Динамика добычи и сжигания ПНГ в Томской обл.

Цель настоящей работы – разработка алгоритма детектирования ФУ на основе КС 10-го и 11-го каналов спутника Landsat-8 и сравнительная оценка объемов выбросов вредных веществ от обнаруженных ФУ на основе литературных данных.

Метод детектирования ФУ на основе КС в 10-м и 11-м каналах Landsat-8

Для детектирования факельных установок в данной работе рассматриваются методы расчета температуры земной поверхности (ТЗП) по КС 4-го (длина волны 636–673 нм), 10-го (10,30–11,30 нм) и 11-го (11500–12510 нм) спектральных каналов Landsat-8.

В течение последних 25 лет за рубежом и в России активно развиваются методы восстановления ТЗП по КС [6–10]. Мы используем два универсальных и простых в применении метода расчета излучательной способности земной поверхности. Алгоритм дешифрирования ФУ, представленный на рис. 3, автоматизирован и реализован в виде графической модели в ERDAS Imagine. Он состоит из четырех блоков (А, Б, В и Г). В результате получается карта температурных участков с ФУ и зонами их теплового воздействия.

Рассмотрим подробнее процедуры вычисления параметров в соответствующих блоках алгоритма.

Вычисления в блоке А проводятся с использованием стандартных формул [7], представленных в нашей работе [4].

В блоке Б излучательная способность земной поверхности рассчитывается для 10-го и 11-го каналов по формуле [8]:

$$\begin{aligned} \epsilon_{10} &= 0,973 - 0,047\rho_{\lambda_4}, \\ \epsilon_{11} &= 0,984 - 0,026\rho_{\lambda_4}, \end{aligned} \quad (1)$$

где ρ_{λ} – спектральное отражение верхней части атмосферы с поправкой на угол падения солнечных лучей, рассчитывается по 4-му каналу Landsat-8 по формуле [7]:

$$\rho_{\lambda} = \frac{M_p Q_{cal} + A_p}{\sin \theta}, \quad (2)$$

где M_p – калибровочный коэффициент спектрального отражения; A_p – калибровочный коэффициент смещения спектрального отражения; θ – угол падения солнечных лучей, значения берутся из файла метаданных, который входит в состав КС Landsat-8; Q_{cal} – цифровое (digital number) значение пикселя.

В блоке В вычисляется ТЗП по КС следующими методами:

1) с учетом логарифма излучательной способности земной поверхности [9],

2) методом «расщепленного окна прозрачности» [10].

В первом методе ТЗП рассчитывается по формуле

$$T_s = \frac{BT}{1 + \left[\left(\frac{\lambda BT}{p} \right) \ln \epsilon \right]}. \quad (3)$$

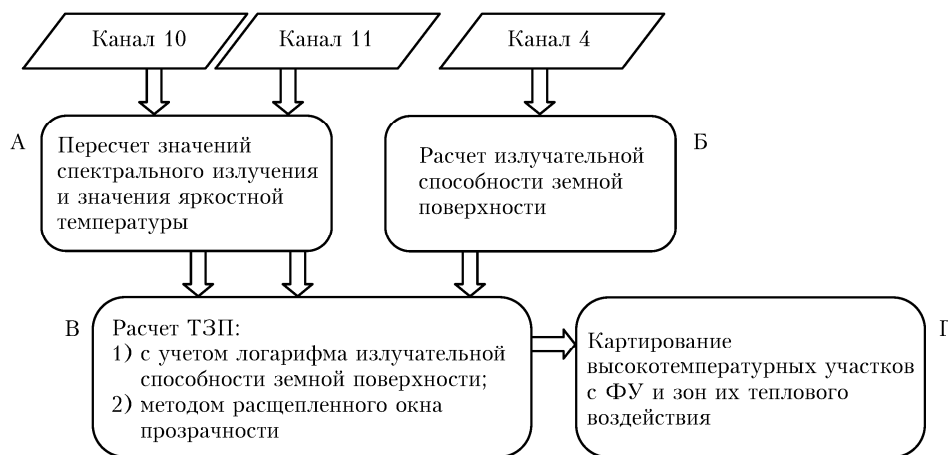


Рис. 3. Блок-схема алгоритма детектирования ФУ на основе расчета ТЗП по КС

Здесь $ВТ$ – яркостная температура, полученная в блоке А по формулам [7]; ϵ – излучательная способность земной поверхности, найденная по формуле (1); λ – длина волны излучения ($\lambda = 10,895$ мкм) для 10-го и ($\lambda = 12$ мкм) 11-го каналов; $p = [1,4388 \times 10^{-2} \text{ м} \cdot \text{К}]$ – вторая радиационная постоянная.

Во втором методе ТЗП восстанавливается по тепловым снимкам в ERDAS Imagine по формуле

$$ТЗП = ВТ_{10} + C_1(ВТ_{10} - ВТ_{11}) + C_2(ВТ_{10} - ВТ_{11})^2 + C_0 + (C_3 + C_4W)(1 - \epsilon) + (C_5 + C_6W)\Delta\epsilon, \quad (4)$$

где W – содержание водяного пара в атмосфере, $\text{г} \cdot \text{см}^{-2}$, рассчитанное с использованием сервисов [11, 12];

$$\epsilon = (\epsilon_{10} + \epsilon_{11})/2 \quad (5)$$

– среднее значение излучательной способности; $ВТ_{10}$ и $ВТ_{11}$ – радиационные температуры каналов 10 и 11, К; $\Delta\epsilon = \epsilon_{10} - \epsilon_{11}$; $C_0 = -0,268$; $C_1 = 1,378$; $C_2 = 0,183$; $C_3 = 54,300$; $C_4 = -2,238$; $C_5 = -129,200$; $C_6 = 16,400$ [10].

Обработка КС с помощью этих двух методов расчета ТЗП доказала их применимость для детектирования факелов на месторождениях в геоинформационных системах (ГИС) ERDAS Imagine 10 и ArcMap 10. Рассчитанная ТЗП на $0,3-2^\circ\text{C}$ отличается от яркостной температуры (до проведения коррекции) (табл. 1). Различие между ТЗП, рассчитанной по КС, и температурой, измеренной метеостанцией, не превышает 2°C . В пяти случаях из восьми, перечисленных в табл. 1, для расчета ТЗП по КС лучше подходит метод «расщепленного окна прозрачности». Так, разница между рассчитанной этим методом ТЗП 26.01.2017 г. и температурой приземного слоя воздуха по данным метеостанций Парабель и Каргасок [13] составила 0°C ; по информации с метеостанции Средний Васюган 25.02.2017 г. эта разница составила всего 1°C (табл. 1). В трех случаях из восьми метод с использованием логарифмирования излучательной способности земной поверхности дал ТЗП ближе к показателям температуры воздуха на метеостанциях, чем метод «расщепленного окна прозрачности».

Таблица 1

Рассчитанная по КС ТЗП и температура приземного слоя воздуха на метеостанциях ($^\circ\text{C}$)

Дата	Яркостная температура (до проведения коррекции)		ТЗП ¹⁾		ТЗП ²⁾	Температура на метеостанции
	Канал 10	Канал 11	Канал 10	Канал 11		
<i>Парабель</i>						
26.01.2017	-29,6	-28,9	-28,7	-28,3	-29	-29
11.02.2017	-28,7	-28,8	-28	-28,7	-29	-28
<i>Каргасок</i>						
26.01.2017	-32	-31	-31	-30,4	-32	-32
11.02.2017	-30,5	-29,6	-30,2	-29	-31	-27
<i>Средний Васюган</i>						
16.12.2016	-27,7	-26,5	-26,3	-25,6	-26	-25
25.02.2017	-8,4	-8,9	-6,4	-7,6	-4	-3
02.02.2017	-18,7	-18	-16,9	-17	-16	-14
<i>Сургут</i>						
18.03.2017	-6	-6	-4	-5	-3	-1

Примечания: 1) ТЗП получена методом логарифмирования; 2) методом «расщепленного окна прозрачности»; серым выделены ячейки, в которых значения температуры земной поверхности наиболее близки к значениям температуры приземного слоя воздуха на метеостанции.

В блоке Г в ArcMap по растрам ТЗП картируются наиболее высокотемпературные пиксели зоны теплового воздействия ФУ и центральный пиксель с ФУ. Рассчитываются площади зон теплового воздействия ФУ на ландшафты. В данном блоке выбор наиболее горячих пикселей возле ФУ в границах месторождений и зоны ее теплового воздействия проводится по методике [4].

Оценка объемов и состава выбросов на месторождениях

Проведем сравнительную оценку объемов выбросов вредных веществ от двух обнаруженных ФУ, типичных для месторождений Васюганской и Среднеобской нефтегазоносной областей. Условно обозначенное месторождение № 1 расположено в Средне-васюганском районе Васюганской нефтегазоносной области, и газонефтяное месторождение № 2 – в центральной части Сургутского нефтегазоносного района Среднеобской нефтегазоносной области. По КС установлено, что на нефтяном месторождении № 1 функционирует одна ФУ по сжиганию ПНГ, на месторождении № 2 – множество ФУ, но для сравнительного анализа выбросов вредных веществ будет использован только один факел. Данные по объему и составу газа и выбросов взяты из [14–16].

Из табл. 2 видно, что нефтяной газ рассматриваемых месторождений значительно отличается по составу. Газ месторождения № 1 характеризуется более низкой концентрацией метана, но повышенным содержанием углекислого газа (в 12 раз больше по сравнению с газом месторождения № 2), азота (почти в 6 раз больше), а также этана и пропана. Газ месторождения № 2 обогащен метаном; содержание углекислого газа, азота, этана и пропана пониженное [14].

С использованием КС по разности температур между средними значениями пикселей месторождения без термовоздействия и горячими пикселями в районе ФУ определены зоны теплового воздействия площадью 0,05 км² для месторождения № 1 и 0,1 км² для месторождения № 2 (табл. 3). Выбор горячих пикселей и пикселей с фоновыми значе-

ниями (без термовоздействия) в пределах месторождений проводился в ГИС ArcMap 10.

Как видно, наибольшая доля в объеме выбросов приходится на оксид углерода СО: для первого факела она составила 65,49%; для ФУ месторождения № 2 – 79%. Количество сажи в общем объеме выбросов равно ~10% для обоих факелов. Выброс диоксида азота NO₂ составляет 2,6% для месторождения № 1 и 0,5% для месторождения № 2. Из табл. 3 видно, что содержание азота в ПНГ месторождения № 1 в 6 раз больше, чем в ПНГ месторождения № 2. В связи с повышенным содержанием метана в ПНГ (83,1% масс., табл. 2) месторождения № 2 в атмосферу его выбрасывается 3481 т/год, что соответствует 8% от общего количества выбросов за год.

Заключение

В работе предложен алгоритм детектирования действующих факельных установок на основе расчета ТЗП двумя методами: методом логарифмирования излучательной способности земной поверхности и методом «расщепленного окна прозрачности». Эти методы позволяют вычислить температуру поверхности Земли по космическим снимкам, максимально близкую к значениям температуры, измеренным на ближайших метеостанциях. Проведен сравнительный анализ массы и состава выбросов при сжигании ПНГ на месторождениях Средне-васюганского и Сургутского нефтегазоносных районов. Установлено, что наибольшую часть выбросов (65,49% для факела месторождения № 1 и 79% для факела месторождения № 2) составляет СО. В процентном отношении от общей массы загрязняющих веществ на месторождении № 1 выбрасывается больше СО₂, чем на месторождении № 2; доля сажи для обоих факелов равна ~10%. Доля метана в выбросах в атмосферный воздух на месторождении № 2 составляет 8%, в связи с его повышенным содержанием в ПНГ. Выбросы оксидов углерода и азота, а также метана при сжигании ПНГ существенно ухудшают экологию нефтегазодобывающих регионов и способствуют усилению парникового эффекта.

Таблица 2

Характеристика месторождений и состав ПНГ

Месторождение	Количество газа в нефти, м ³ /т	Добыча нефти, тыс. т	Состав газа, % масс.							
			CO ₂	N ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	C ₅ H ₁₂	Прочие
№ 1	73	179	2,56	4,68	62,58	9,24	11,24	4,02	0,95	4,7
№ 2	146,46	6000	0,20	0,80	83,10	2,60	6,20	4,50	2,30	0,30

Таблица 3

Выбросы ФУ загрязняющих веществ в атмосферу при сжигании ПНГ [15, 16]

Месторождение	Вычисленная площадь зоны теплового воздействия, км ²	Выбросы загрязняющих веществ в атмосферу, т/год			
		СО	Сажа	NO ₂	Всего
№ 1	0,05	1330,52	212,138	52,213	2031,64
№ 2	0,1	34186,12	4102,33	218,8	43274

1. *Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2016 году»*. М.: Минприроды России; НИИ-Природа, 2017. 760 с.
2. *Доклад об экологической ситуации в Ханты-Мансийском автономном округе – Югре в 2016 году* // Департамент экологии Ханты-Мансийского автономного округа – Югры. Ханты-Мансийск: ОАО «НПЦ Мониторинг», 2017. 205 с.
3. *Экологический мониторинг: Доклад о состоянии и охране окружающей среды Томской области в 2017 году: Департамент природных ресурсов и охраны окружающей среды Томской области. ОГБУ «Облкомприрода»*. Томск: Дельтаплан, 2018. 158 с.
4. *Алексеева М.Н., Яценко И.Г., Перемитина Т.О.* Тепловое воздействие на нефтедобывающие территории Томской области при сжигании попутного нефтяного газа // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2018. Т. 15, № 5. С. 52–60.
5. *Книжников А.Ю., Ильин А.М.* Проблемы и перспективы использования попутного нефтяного газа в России. М.: Всемирный фонд дикой природы, 2017. 32 с.
6. *Афонин С.В., Соломатов Д.В.* Методика учета оптико-метеорологического состояния атмосферы для решения задач атмосферной коррекции спутниковых ИК-измерений // *Оптика атмосф. и океана*. 2008. Т. 21, № 2. С. 147–153.
7. *Using the USGS Landsat-8 Product: Landsat-8 user guide. United States Geological Survey* [Electronic resource]. URL: http://landsat.usgs.gov/Landsat8_Using_Product.php (last access: 11.01.19).
8. *Xiaolei Yu, Xulin Guo, Zhaocong Wu.* Land surface temperature retrieval from Landsat-8 TIRS – comparison between radiative transfer equation-based method split window algorithm and single channel method // *Remote sens.* 2014. V. 6. P. 9829–9852. DOI: 10.3390/rs6109829.
9. *Avdan U., Jovanovska G.* Algorithm for automated mapping of land surface temperature using Landsat-8 satellite data [Electronic resource] // *J. Sens.* V. 2016. URL: <http://dx.doi.org/10.1155/2016/1480307> (last access: 11.01.2019).
10. *Зарев С.А., Насири А.М., Щербаков В.М., Широкова В.А.* Применение алгоритма расщепленного окна прозрачности для расчета температуры земной поверхности на основе материалов тепловой космической съемки // *Успехи современного естествознания*. 2017. № 6. С. 77–82.
11. *Atmospheric Correction Parameter Calculator* [Electronic resource]. URL: <https://atmcorr.gsfc.nasa.gov/> (last access: 11.01.2019).
12. *AERONET. Aerosol robotic network* [Electronic resource]. URL: https://aeronet.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/data_display_aod_v3 (last access: 11.01.2019).
13. *Погода и климат* [Электронный ресурс]. URL: <http://www.pogodaiklimat.ru/archive.php?id=ru®ion=70> (дата обращения: 11.01.2019).
14. *Яценко И.Г.* Попутный нефтяной газ Западной Сибири // *Булатовские чтения: материалы II Международной научно-практической конференции (31 марта 2018 г.)*. Краснодар: Издательский Дом – Юг, 2018. Т. 2. Ч. 2. С. 255–261.
15. *Трофимова А.Е., Алексеева М.Н., Парфенова Г.К.* Оценка воздействия нефтедобывающего предприятия на приземный слой атмосферы // *Булатовские чтения: материалы II Международной научно-практической конференции (31 марта 2018 г.)*. Краснодар: Издательский Дом – Юг, 2018. Т. 5. С. 299–303.
16. *Яранцева С.М.* Геоэкологическая характеристика и проект мониторинга Катыльгинского нефтяного месторождения (Томская область): дипломный проект. Томск. 2016 [Электронный ресурс]. URL: <http://earchive.tpu.ru/handle/11683/29877?mode=full> (дата обращения: 11.01.2019).

M.N. Alekseeva, I.G. Yashchenko. **Algorithm for detection of gas flaring units and assessment of emissions.**

An automated algorithm is suggested for detection of gas flaring units. It is based on the calculation of the land temperature from Landsat 8 satellite imagery using two methods for retrieving the Earth's surface temperature. The methods include calculation of the Earth's surface emissivity and solution of the equation accounting the atmospheric water vapor content. The difference between Earth's surface temperature calculated and the temperatures measured at meteorological stations does not exceed 2 °C. Two gas flaring units were detected with the algorithm in Tomsk Oblast and in Khanty-Mansi Autonomous Okrug. Carbon monoxide prevails in the emissions associated with gas flaring. The emissions of carbon, nitrogen, and methane oxides significantly contribute to environmental degradation of oil and gas producing regions and to the greenhouse effect.