

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗОН ТЕРМИЧЕСКОГО И ХИМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЙ ПРИ СЖИГАНИИ ПОПУТНОГО НЕФТЯНОГО ГАЗА

*Мария Николаевна Алексеева*

Институт химии нефти СО РАН, 634055, Россия, г. Томск, пр. Академический, 4, кандидат географических наук, младший научный сотрудник лаборатории Научно-исследовательский информационный центр с музеем нефти, тел. (3822)49-10-42, e-mail: amn@ipc.tsc.ru

*Ирина Германовна Яценко*

Институт химии нефти СО РАН, 634055, Россия, г. Томск, пр. Академический, 4, кандидат геолого-минералогических наук, зав. лабораторией Научно-исследовательский информационный центр с музеем нефти, тел. (3822)49-18-11, e-mail: sric@ipc.tsc.ru

Апробирована методика моделирования зон термического и химического воздействия на природную среду в случае действующей факельной установки по сжиганию попутного природного газа на примере нефтегазового месторождения в Ханты-Мансийском АО. По космическим снимкам среднего пространственного разрешения (30 м) со спутника Landsat 8, полученных в зимний период 2015, 2017 и 2018 гг., и с использованием геоинформационных технологий построены зоны теплового и химического воздействий при сжигании газа, что позволяет определить уровень загрязнения и причиненный экологический ущерб на территории месторождения.

**Ключевые слова:** факельная установка, попутный нефтяной газ, космические снимки Landsat 8, зоны термического и химического воздействий.

## MODELLING OF ZONES OF THERMAL AND CHEMICAL EFFECTS BY BURNING OF ASSOCIATED PETROLEUM GAS

*Maria N. Alekseeva*

Institute of petroleum chemistry SB RAS, 4, Prospect Akademicheskii St., Tomsk, 634055, Russia. Ph. D., Junior Researcher of Laboratory of Scientific-research Information Center with a Museum of Oil, phone: (3822)49-10-42, e-mail: amn@ipc.tsc.ru

*Irina G. Yashchenko*

Institute of petroleum chemistry SB RAS, 4, Prospect Akademicheskii St., Tomsk, 634055, Russia. Ph. D., Head of Laboratory of Scientific-research Information Center with a Museum of Oil, phone: (3822)49-22-27, e-mail: sric@ipc.tsc.ru

With the use of satellite images of the winter period, operating oil and gas torches were installed at the Fedorov field. With the use of satellite images Landsat 8, zones of their thermal impact on the surrounding area were built. The zone of chemical impact on the environment is calculated on the example of a typical for the oil industry of the Khanty-Mansiysk flaring plant.

**Key words:** flare unit, associated petroleum gas, space images Landsat 8, the area of thermal and chemical effects.

## *Введение*

В нефтегазодобывающих регионах России в процессе добычи и перегонки нефти в отсутствие необходимого оборудования и инфраструктуры проводится сжигание растворенного в нефти попутного нефтяного газа (ПНГ). Например, в России в 2016 г. объем сожженного в факельных установках газа превысил 12,3 млрд. м<sup>3</sup> и до настоящего времени уровень его полезного использования еще не достиг установленной государством нормы в 95 % [1].

На долю Ханты-Мансийского АО приходится 43,7 % общероссийской добычи нефти. В 2017 г. по официальным данным [2] при увеличении добычи (по сравнению с 2016 годом) ПНГ до уровня 35 млрд. м<sup>3</sup> произошло уменьшение объема его сжигания (4,5 млрд. м<sup>3</sup>). Однако, существует мнение о неточности официальных оценок из-за недостатков или отсутствия автоматизированных систем измерения и учета ПНГ в процессе сепарации и сжигания на факельных установках (ФУ) [3-9]. Для решения данной проблемы перспективно применение данных, полученных с помощью методов дистанционного зондирования Земли.

Целью данной работы является моделирование зон термического и химического воздействия при сжигании ПНГ для мониторинговых исследований экологического состояния природной среды на основе космических снимков (КС) Landsat 8.

### *Объекты и методы исследований*

Объектом является нефтегазовое месторождение, расположенное в Ханты-Мансийском АО вблизи города Сургут. Методы исследования включают в себя тематическое картирование территории месторождения с действующими факельными установками по сжиганию ПНГ, пространственный анализ данных с использованием геоинформационных технологий, моделирование и расчет зон химического и теплового воздействий по космическим снимкам среднего пространственного разрешения (30 м) со спутника Landsat 8 (свободный доступ в сети Интернет), полученных в зимний период 2015, 2017 и 2018 гг. из архива Геологической службы США.

Моделирование зон термического и химического воздействия при сжигании попутного нефтяного газа включает 5 блоков (рис. 1). Входной информацией модели являются данные 4 (длина волны 636–673 нм), 10 (длина волны 10,30–11,30 нм) и 11 (длина волны 11500–12 510 нм) спектральных каналов КС Landsat 8. Алгоритм моделирования, представленный на рис. 1, автоматизирован и реализован в виде графической программы в Erdas Imagine 10.

В блоках А, Б, В проводится расчет температуры земной поверхности (ТЗП) на основе КС Landsat 8. Известны зарубежные и отечественные методы восстановления ТЗП из космических снимков [10-13]. В данной работе рассматривается применение двух вариантов восстановления ТЗП: с логарифмированием излучательной способности земной поверхности и методом «расщеп-

ленного окна прозрачности», преимуществом которых является универсальность и простота использования.



Рис. 1. Блок-схема моделирования зон термического и химического воздействия при сжигании попутного нефтяного газа на основе КС Landsat 8

Перевод значений спектрального излучения в значения яркостной температуры (блок А рис. 1) проводим с использованием стандартных формул [14]. В блоке Б определяем излучательную способность земной поверхности отдельно для 10 и 11 каналов. Излучательная способность земной поверхности – это коэффициент, показывающий отношение (спектральной) яркости земной поверхности к (спектральной) яркости абсолютно черного тела. На основе КС Landsat 8 излучательная способность рассчитывается по формуле [11]:

$$\varepsilon_{10} = 0,973 - 0,047\rho\lambda_4, \quad \varepsilon_{11} = 0,984 - 0,026\rho\lambda_4, \quad (1)$$

где  $\rho\lambda$  - значение спектрального отражения верхней части атмосферы с поправкой на угол падения солнечных лучей, рассчитывается по 4 каналу Landsat 8 по формуле [14]:

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

В блоке В осуществляем расчет температуры ТЗП по КС следующими методами:

1. С учетом логарифма излучательной способности земной поверхности.
2. Методом «расщепленного окна прозрачности».

Первый вариант расчета ТЗП учитывает логарифм излучательной способности земной поверхности и рассчитывается по формуле [12]:

$$T_s = \frac{BT}{\{1 + [(\frac{\lambda BT}{p}) \ln \varepsilon]\}}, \quad (3)$$

где  $BT$  – яркостная температура, рассчитанная в блоке А по формулам [14],  $\varepsilon$  – излучательная способность земной поверхности, рассчитанная по формуле (1),  $\lambda$  – длина волны излучаемого излучения для 10 канала ( $\lambda = 10,895$ ) и 11 канала ( $\lambda = 12$ ),  $p$  – вторая радиационная постоянная, которая равна  $1,4388 * 10^{-2}$  м·К.

Второй метод расчета ТЗП по тепловым снимкам условно обозначен «методом расщепленного окна прозрачности». Вычисления проведены с использованием программного обеспечения Erdas Imagine 10 по формуле [13]:

$$TЗП = BT_{10} + C_1 * (BT_{10} - BT_{11}) + C_2 * (BT_{10} - BT_{11})^2 + C_0 + (C_3 + C_4 * W) * (1 - \varepsilon) + (C_5 + C_6 * W) * \Delta\varepsilon \quad (4)$$

где  $W$  – содержание водяного пара в атмосфере. Содержание водяного пара в атмосфере рассчитано с использованием сервисов [15, 16],  $\varepsilon$  – среднее значение излучательной способности, вычисляется по формуле:

$$\varepsilon = (\varepsilon_{10} + \varepsilon_{11}) / 2, \quad (5)$$

где  $\varepsilon_{10}$  и  $\varepsilon_{11}$  – излучательные способности земной поверхности по данным 10 и 11 каналов КС Landsat 8, вычисленные по формуле (1),  $BT_{10}$  и  $BT_{11}$  – радиационные температуры каналов 10 и 11, измеряемые в кельвинах,  $\Delta\varepsilon = \varepsilon_{10} - \varepsilon_{11}$ . Остальные коэффициенты уравнения приведены в [13] и составляют:  $C_0 = -0,268$ ,  $C_1 = 1,378$ ,  $C_2 = 0,183$ ,  $C_3 = 54,300$ ,  $C_4 = -2,238$ ,  $C_5 = -129,200$ ,  $C_6 = 16,400$ .

В блоке Г из растровых изображений ТЗП с использованием ArcMap картируются в виде полигонов наиболее высокотемпературные пиксели с центром расположения факела и зона теплового воздействия по методике из работы [6]. Рассчитана площадь зоны теплового воздействия на ландшафты вокруг ФУ.

В блоке Д зона рассеивания вредных веществ при сжигании ПНГ исследуемого месторождения (или зона химического воздействия) построена на основе формул [17]:

$$X = \frac{5 - F}{4} * d * H, \quad (6)$$

где  $F$  – коэффициент, зависящий от степени очистки. Коэффициент  $d$  вычислен по формуле:

$$d = 16 * \sqrt{v' * m}, \quad (7)$$

где  $v'm=1,3 * \frac{w_0 * D}{H}$ ,  $w_0$  – средняя скорость выхода газовой смеси из устья ФУ, м/с;  $D$  – диаметр трубы ФУ, м;  $H$  – высота источника выброса, м.

### *Результаты и обсуждения*

Установлено, что приведенные методы расчета ТЗП из 10 и 11 каналов КС Landsat 8 существенно повышают качество детектирования факелов на месторождениях. Вычисленная ТЗП всего на  $0,3 - 2 \text{ }^\circ\text{C}$  отличается от яркостной температуры (до проведения коррекции). Расхождения между рассчитанными по спутниковым данным ТЗП в пикселе с метеостанцией Сургут и наземными климатическими данными [18] не превышают  $2 \text{ }^\circ\text{C}$ . В большинстве случаев для расчета ТЗП по дистанционным данным наиболее оправдано использование метода «расщепленного окна прозрачности». Так, разница между рассчитанной методом «расщепленного окна прозрачности» ТЗП датой съемки 26.01.2017 г. и температурой приземного слоя воздуха метеостанции Сургут [18] в этот день составила  $0 \text{ }^\circ\text{C}$ . По нашим данным, в 3 случаях из 8 ТЗП, рассчитанные с использованием логарифмирования излучательной способности земной поверхности разновременных КС, почти совпадают с показаниями метеоданных в аналогичные даты.

Фрагмент итоговой карты на рис. 2, выполнен в поперечной проекции Меркатора и показывает расположение ФУ с зонами термического и химического воздействий. Обозначение пикселя КС с ФУ и оцифровка границ зоны теплового воздействия при сжигании ПНГ выполнена с использованием ArcMap 10.1.

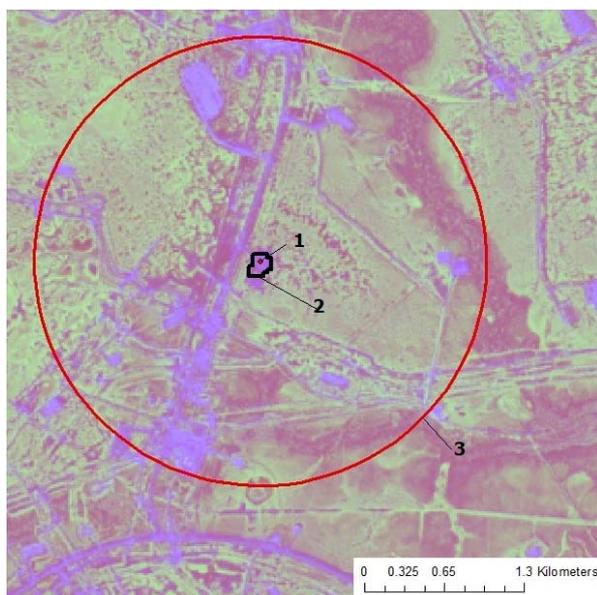


Рис. 2. Расположение ФУ (обозначен цифрой 1) и границ зон воздействия. Обозначение границ зон: 2 – зона термического воздействия, 3 – зона рассеивания загрязняющих веществ

Длина наибольшего радиуса зоны теплового воздействия от горящего факела составляет 260 м. Площадь зоны теплового воздействия составляет 0,1 км<sup>2</sup>.

Расчитанная зона рассеивания и возможного выпадения аэрополлютантов с осадками (блок Д рис. 1, рис. 2) охватывает лесоболотные комплексы и производственные объекты месторождения. Радиус зоны рассеивания загрязняющих веществ при высоте трубы ФУ – 24,5 м, диаметре устья 0,85 и средней скорости выхода газовоздушной смеси 494,06 м/с равен 1850 м.

В таблице приведены максимально разовые предельно–допустимые концентрации загрязняющих веществ в атмосферном воздухе [19] и вычисленные согласно методике [17] значения максимальных концентраций загрязняющих веществ в зоне химического воздействия радиусом 1850 м от действующей ФУ (граница 3 на рис. 2). Установлено, что на расстоянии 1850 м от факела на подстилающей поверхности территории месторождения присутствует весь перечень загрязняющих веществ (таблица).

Максимальная приземная разовая концентрация  
загрязняющих веществ при сжигании ПНГ

№	Загрязняющее вещество	Максимальная разовая ПДК (мг/м <sup>3</sup> )	Среднесуточная величина ПДК (мг/м <sup>3</sup> )	Вычисленная максимальная приземная разовая концентрация (мг/м <sup>3</sup> )
1	азота диоксид NO <sub>2</sub>	0,085	0,04	0,006
2	азота оксид NO	0,4	0,06	0,001
3	углерод (сажа)	0,15	0,5	0,1
4	сера диоксид SO <sub>2</sub>	0,5	0,05	0,0009
5	дигидросульфид (сероводород) H <sub>2</sub> S	0,008		0,00002
6	углерод оксид CO	5	3	1
7	бутан C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	200	-	0,01
8	гексан C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	60	-	0,005
9	пентан C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	100	25	0,007
10	метан CH <sub>4</sub>	50	-	0,1
11	этан C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	-	-	0,01
12	бензапирен	-	0,000001	0,0000000003

В целом, значения максимальной приземной разовой концентрации загрязняющих веществ при удалении от ФУ на 1850 м не превышают значения максимально разовых и среднесуточных ПДК из табл. 1. Однако, следует обратить внимание на выбросы оксида углерода, максимальная разовая ПДК которого составляет 5 мг/м<sup>3</sup>. С учетом того, что ФУ функционирует круглый год, создавая ежедневные выбросы, целесообразно учитывать также среднесуточную ПДК углерода оксида, составляющую 3 мг/м<sup>3</sup>. В нашем случае, на расстоянии 1850 м от ФУ вычисленная максимальная приземная концентрация данного ве-

щества составила 1 мг/м<sup>3</sup>. Максимальная приземная концентрация углерода (сажи) на расстоянии 1850 м от ФУ близка к ПДК и составляет 0,1 мг/м<sup>3</sup> [19].

Всего в 2015 г. от одного факела рассматриваемого месторождения было выброшено 43274 т загрязняющих веществ, в том числе 34186,12 т оксид углерода, 4102,33 т сажи, 3481,4 т метана и 218,8 т азота диоксида. Установлено, что наибольший вклад (79 %) в загрязнение атмосферного воздуха вносит оксид углерода. В связи с повышенным содержанием метана в ПНГ данного месторождения [20] выбросы метана в атмосферу от одного факела значительны и в 2015 г. составили 8 % от общего количества выбросов за год.

### ***Заключение***

Таким образом, с помощью КС Landsat 8 на территории месторождения апробирована методика моделирования границ и вычисления площади зоны термического влияния на приземную поверхность от горящего факела. В приземном слое атмосферы определены концентрации загрязняющих веществ при сжигании ПНГ. В зоне химического воздействия установлено наличие основных загрязняющих веществ при сжигании ПНГ. Получено, что химическое загрязнение территории на расстоянии 1850 м от действующей ФУ незначительно и не превышает значения максимальных разовых ПДК, что связано с процессом рассеивания примесей, температурой и высотой выхода газовой смеси. Однако следует учитывать эффект приноса и суммации выбросов от других факельных установок на месторождении. В местах перекрытия зон от множества ФУ необходимы контрольные измерения концентраций загрязняющих веществ.

### ***Благодарности***

Работа выполнена с финансовой поддержкой проекта НИР ПФНИ ГАН на 2013-2020 годы V.46.1.2. «Диагностика состояния и восстановления природных экосистем на объектах нефтегазового комплекса Западной Сибири и прилегающих территориях» №ГРАААА-А17-117030310200-4.

### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2016 году». – М. : НИА – Природа, 2017. – 760 с.
2. Доклад об экологической ситуации в Ханты-Мансийском автономном округе – Югре в 2016 году: ежегодный отчет Департамента экологии Ханты – Мансийского автономного округа – Югры. – Ханты – Мансийск : ОАО «НПЦ Мониторинг», 2017. – 205 с.
3. Книжников А. Ю., Ильин А. М. Проблемы и перспективы использования попутного нефтяного газа в России. – М. : Всемирный фонд дикой природы (WWF), 2017. – 32 с.
4. Алексеева М.Н., Перемитина Т.О., Яценко И.Г. Применение спутниковых данных для выявления и картографирования высокотемпературных участков нефтедобывающих территорий Западной Сибири // Оптика атмосферы и океана. – 2016. – Т. 29, № 6. – С. 525–528.
5. Алексеева, М. Н., Яценко И. Г. Детектирование факельных установок и определение зон их теплового воздействия на нефтедобывающие территории Томской области // Интер-

экспо ГЕО-Сибирь. XIV Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 23–27 апреля 2018 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2018. Т. 2. – С. 287–296.

6. Алексеева М. Н. 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.

7. Мячина К. В. Тепловое загрязнение степных ландшафтов Урало-Заволжья в районах нефтегазодобычи: анализ на основе спутниковых данных // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. – 2017. – Т.28, № 5. – С. 44–55.

8. Кочергин Г. А., Куприянов М. А., Полищук Ю. М. Использование космических снимков Landsat 8 для оперативной оценки суммарного объема факельного сжигания попутного газа на нефтедобывающей территории // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2017. – Т. 14, № 5. – С. 47–55.

9. Elvidge C. D., Zhizhin M., Baugh K., Hsu F. C. Ghosh T. Methods for Global Survey of Natural Gas Flaring from Visible Infrared Imaging Radiometer Suite Data // Energies. – 2016. – Vol. 9 (1). – P. 14. DOI: 10.3390/en9010014.

10. Афонин С. В., Соломатов Д. В. Методика учета оптико-метеорологического состояния атмосферы для решения задач атмосферной коррекции спутниковых ИК-измерений // Оптика атмосферы и океана. – 2008. – Т. 21, № 02. – С. 147–153.

11. 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 sensing. – 2014. – № 6. – P.9829–9852: doi: 10.3390/rs6109829 [Electronic resource]. – Mode of access : [www.mdpi.com/journal/remotesensing](http://www.mdpi.com/journal/remotesensing) (дата обращения: 28.03.19).

12. Avdan U., Jovanovska G. Algorithm for automated mapping of land surface temperature using LANDSAT 8 satellite data // Journal of Sensors. – 2016 [Electronic resource]. – Mode of access : <http://dx.doi.org/10.1155/2016/1480307> (дата обращения: 25.03.2019).

13. Зареи С. А., Насири А. М., Щербаков В. М., Широкова В. А. Применение алгоритма расщеплённого окна прозрачности для расчёта температуры земной поверхности на основе материалов тепловой космической съёмки // Успехи современного естествознания. – 2017. – № 6. – С. 77–82.

14. Using the USGS Landsat 8 Product: Landsat 8 userguide. United States Geological Survey [Electronic resource]. – Mode of access : [http://landsat.usgs.gov/Landsat8\\_Using\\_Product.php](http://landsat.usgs.gov/Landsat8_Using_Product.php) (дата обращения: 24.03.2019).

15. AERONET. Aerosol robotic network [Electronic resource]. – Mode of access : [https://aeronet.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/data\\_display\\_aod\\_v3](https://aeronet.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/data_display_aod_v3) (дата обращения: 20.03.2019).

16. Atmospheric Correction Parameter Calculator [Electronic resource]. – Mode of access : <https://atmcorr.gsfc.nasa.gov/> (дата обращения: 28.03.2019).

17. Методы расчетов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе [Electronic resource]. – Mode of access : <http://docs.cntd.ru/document/456074826> (дата обращения: 28.03.2019).

18. Погода и климат [Electronic resource]. – Mode of access : <http://www.pogodaiklimat.ru> (дата обращения: 25.03.2019).

19. Предельно допустимые концентрации загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест ГН 2.1. 6.695–98 [Electronic resource]. – Mode of access : <http://www.gosthelp.ru/text/GN21669598Predelnodopusti.html> (дата обращения: 24.03.2019).

20. Яценко И. Г., Полищук Ю. М. Трудноизвлекаемые нефти: физико–химические свойства и закономерности размещения: монография. – Томск: В – Спектр, 2014. – 154 с.

© М. Н. Алексеева, И. Г. Яценко, 2019