

ФИЗИЧЕСКАЯ ГЕОГРАФИЯ И БИОГЕОГРАФИЯ, ГЕОГРАФИЯ ПОЧВ И ГЕОХИМИЯ ЛАНДШАФТОВ

УДК 622.276

DOI 10.25587/SVFU.2023.29.1.003

И.Х. Асадов¹, Ю.Г. Данилов²

¹ Национальное Аэрокосмическое Агентство Республики Азербайджан. г. Баку, Республика Азербайджан

² Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, г. Якутск, Россия

E-mail: asadzade@rambler.ru

E-mail: dan57sakha@mail.ru

ВОПРОСЫ ВЗАИМОКАЛИБРОВКИ СПУТНИКОВЫХ СРЕДСТВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОБЪЕМА СЖИГАЕМОГО ПОПУТНОГО ГАЗА В ФАКЕЛАХ

Аннотация. Проанализирована возможность проведения взаимной калибровки спутниковых средств определения объема сжигаемого попутного газа в факелах на нефтяных месторождениях. Рассмотрены существующие спутниковые методы оценки общего количества сжигаемого в факелах углеводородного попутного газа, реализуемые на базе данных MODIS и VIIRS. Произведен анализ методики определения мощности оптического радиационного излучения факелов на базе данных MODIS. Разработаны методы межсенсорной калибровки спутниковых измерителей, реализуемые путем внесения аддитивной калибровочной поправки на измеренную температуру объектов вне факела в первом случае, когда данные MODIS калибруются по показаниям VIIRS и на излучательность факела, в случае если показания VIIRS калибруются по показаниям MODIS. Приведены расчеты определения температуры факела, площади поверхности факела и радиационного тепла на единичную площадь. Определены алгоритмы межсенсорной калибровки. Рассмотрена и решена задача оптимального выбора температуры факелов углеводородного попутного газа, при котором эмиссия аэрозоля типа элементного углерода (BC) может быть уменьшена по сравнению с максимальным уровнем генерации. Проведен анализ при какой средней температуре следует ожидать максимальную эмиссию BC, если статистика частотности факелов углеводородного попутного газа полностью известна. Определены значения, при которых эмиссия BC была бы максимальной.

Ключевые слова: попутный газ, калибровка, спутниковые измерения, факел, температура

I.Kh. Asadov¹, Yu.G. Danilov²

¹National Aerospace Agency of the Republic of Azerbaijan. Baku, Republic of Azerbaijan

²North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russia

E-mail: asadzade@rambler.ru

E-mail: dan57sakha@mail.ru

ISSUES OF MUTUAL CALIBRATION OF SATELLITE TOOLS FOR DETERMINING THE VOLUME OF BURNED ASSOCIATED GAS IN FLARE

Abstract. The possibility of carrying out mutual calibration of satellite means for determining the volume of associated gas burned in flares at oil fields is analyzed. Existing satellite methods for estimating the total amount of associated hydrocarbon gas flared, implemented on the basis of MODIS and VIIRS data, are considered. An analysis was made of the technique for determining the power of optical radiation from torches on the basis of the MODIS database. Methods were developed for intersensor calibration of satellite meters, implemented by introducing an additive calibration correction for the measured temperature of objects outside the plume in the

first case, when the MODIS data were calibrated according to the VIIRS readings and for the plume emissivity, in the case when the VIIRS readings are calibrated according to the MODIS readings. Calculations were given for determining the temperature of the torch, the surface area of the torch and radiation heat per unit area. Algorithms for intersensor calibration were determined. The problem of the optimal choice of the temperature of hydrocarbon associated gas torches, at which the emission of an aerosol of the elemental carbon (BC) type can be reduced in comparison with the maximum level of generation, is considered and solved. An analysis was made at what average temperature should the maximum BC emission be expected, if the statistics of the frequency of hydrocarbon associated gas flares are fully known. The values at which the BC emission would be maximum were determined.

Keywords: associated gas, calibration, satellite measurements, flame, temperature

Введение

Сжигание попутного газа, появляющегося при нефтедобыче, или при сжигании природного газа в факелах является технологической операцией высокотемпературного окисления этой продукции в факельных установках. Сжигание углеводородных газов в факелах неизбежно приводит к выбросу в атмосферу CO_2 , являющегося основным фактором глобального потепления климата [1, 2]. Согласно оценкам Всемирного Банка, каждый год в факелах сжигается около 150 миллиардов кубических метров природного газа, что эквивалентно 30 % всего объема потребляемого газа в Европейском Союзе. Сжигание ежегодно газа в объеме 400 миллионов тонн в год приводит к выбросу в атмосферу такого объема CO_2 , который эквивалентен 1,2 % всех ежегодных эмиссий этого газа на планете [3]. Первые работы по спутниковому контролю объемов сжигаемого в факелах газа появились в 70-х, 80-х годах прошлого столетия [4, 5]. Принцип такого контроля заключался в регистрации светового излучения факелов, поступающего на вход фоточувствительной бортовой аппаратуры. Первые практические работы были осуществлены по программе GGFR Всемирного Банка с помощью спутников NOAA в 2002 году. Бортовая аппаратура, установленная на этих спутниках, регистрировала световой сигнал в спектральном диапазоне 0,5-0,9 мкм с пространственным разрешением 2,7 км. При этом, для каждой страны была разработана индивидуальная модель калибровки данных измерений. Для устранения таких недостатков как низкое пространственное разрешение, отсутствие калибровки на борту, невозможность учета некоторых стран было предложено использовать для этой цели данные спектрорадиометра MODIS [6]. Была разработана методика измерений, в которой использовались данные как среднего инфракрасного диапазона (MIR), так и термального инфракрасного диапазона (TIR) [7, 8]. Национальный центр Геофизических данных (NGDC) также разработал методику, основанную на информации получаемой только с каналов MIR диапазона [1, 6]. Начиная с 2011 года NGDC используют данные спектрорадиометров VIIRS, которые имеют высокое пространственное разрешение, высокую чувствительность, а также средства калибровки, что позволило различить газовые факела от сжигания биомассы и вулканов.

Анализ методик, используемых для спутниковой оценки объема сжигаемого газа

Одна из наиболее практичных методик определения мощности оптического радиационного излучения факелов на базе данных MODIS была предложена в работе [9]. Согласно этой методике радиационная мощность газового факела может быть определена по формуле.

$$FRP = 4,34 \cdot 10^{-19} (T_4^8 - T_{4b}^8) \left(\frac{B_M}{M^2} \right) \quad (1)$$

где:

T_4 – яркостная температура, измеренная на длине волны 4 мкм (MIR), факела;

T_{4b} – яркостная температура, измеренная на той же длине волны, окружающих факел объектов.

Согласно [10], формула (1) верна для факелов в диапазоне температур (600-1500 K).

Согласно работе [11], разработана регрессионная модель между показателем объема сжигаемого газа и FRP в виде

$$GFV_1 = 2442,7 \cdot FRP \quad (2)$$

где GFV_1 – объем сжигаемого газа в см^3 .

Точность оценки GFV по формуле (2) не превышает 2 %. Соответствующая регрессионная кривая приведена на рис. 1.

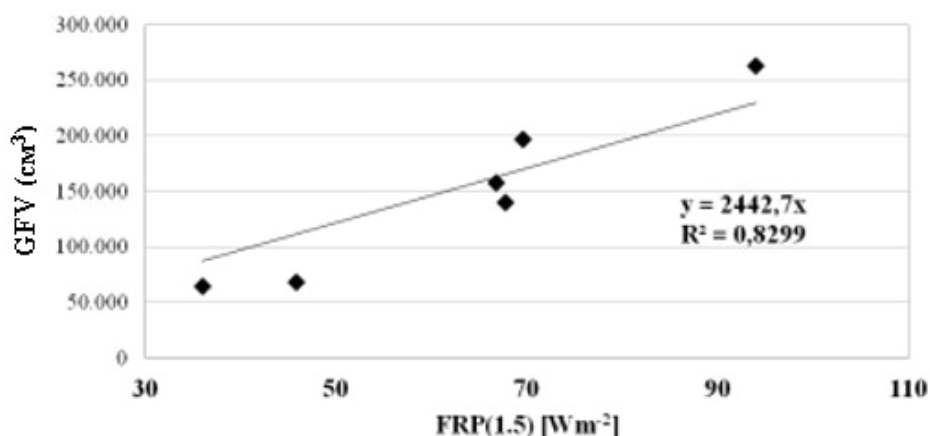


Рис. 1. Регрессионная зависимость между показателями GFV и FRP

Fig. 1 Regression relationship between GFV and FRP

Вместе с тем, существует методика определения объема сжигаемого газа по программе GGFR Всемирного Банка в сотрудничестве с NOAA примененных для спутников, запущенных в 2012 и 2017 годах, в которых используется спектро радиометры VIIRS. Согласно [12], эти спутники проводят ночные измерения несколько раз за ночь и работают на длине волны, в которой эмиссия максимальна. Детекторы VIIRS позволяют ежегодно обнаруживать более 10000 факелов сжигания газа [13].

Согласно [13], также существует линейная регрессионная связь между оценками радиационного тепла VIIRS и оценками объема сжигаемого газа (рис. 2).

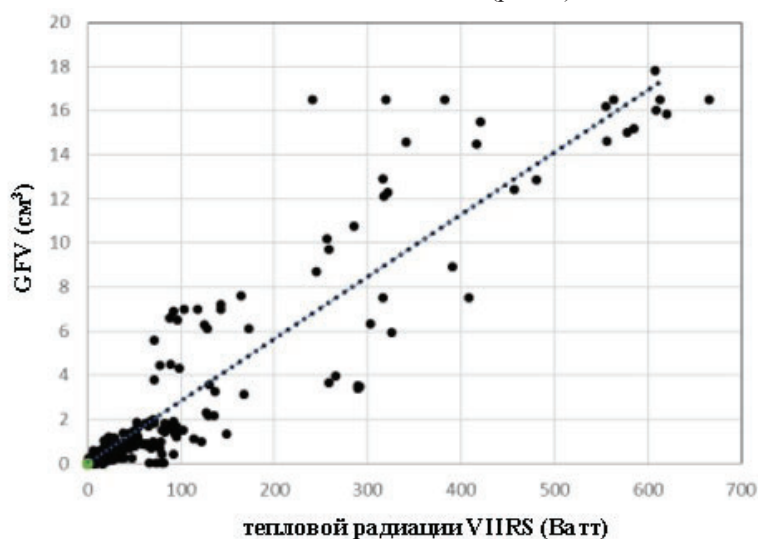


Рис. 2. Регрессионная связь между показателями оценки тепловой радиации VIIRS и GFV

Fig. 2. Regression relationship between indicators of thermal radiation estimates VIIRS and GFV

Методика оценки GFV на базе данных VIIRS заключается в следующем [13]. Температура факела определяется по формуле:

$$T = b/\lambda_{max} \quad (3)$$

где: T измеряется в К;

b – постоянная Вина;

λ_{max} – длина волны, на которой кривая Планка достигает максимума.

Радиационное тепло на единичную площадь J определяется как

$$J = \sigma \cdot \varepsilon \cdot T^4 \quad (4)$$

где: J измеряется в (Ватт/м²); ε – излучательность; σ – постоянная Стефана-Больцмана.

Площадь поверхности факела (м²), S определяется по формуле:

$$S = \frac{h_0}{h_d} \cdot S_0 \quad (5)$$

где: h_0 – высота кривой Планка при текущем измерении радиации;

h_d – максимально возможная высота кривой Планка при проводимых измерениях;

S_0 – площадь чувствительной поверхности фотоприемника.

Общее радиационное тепло RH определяется в Ваттах как

$$RH = J \cdot S \quad (6)$$

Объем сжигаемого газа в м³ определяется как

$$GFV_2 = RH \cdot J \cdot 0,0281 \quad (7)$$

Предлагаемый метод

С учетом вышеизложенных методик определения показателя GFV по показаниям MODIS и VIIRS можно предложить следующие методы межсенсорной калибровки указанных приборов.

1. Калибровка MODIS по показаниям VIIRS. С учетом (1), (2) и (7) запишем: $GFV_1 = GFV_2$, или

$$2442,7 \cdot 4,34 \cdot 10^{-19} [T_4^8 - (T_{4b} \pm \Delta T_{4b})^8] = \frac{RH \cdot J \cdot 0,0281}{10^6} \quad (8)$$

Как видно из (8), здесь используется калибровочная аддитивная составляющая применительно к T_{4b} . Из (8) получим

$$[T_4^8 - (T_{4b} \pm \Delta T_{4b})^8] = 0,0264 \cdot 10^8 \cdot J \cdot RH \quad (9)$$

Из (9) получаем

$$(T_{4b} \pm \Delta T_{4b})^8 = T_4^8 - 0,0264 \cdot 10^8 \cdot J \cdot RH \quad (10)$$

или

$$T_{4b} \pm \Delta T_{4b} = \sqrt[8]{T_4^8 - 0,0264 \cdot 10^8 \cdot J \cdot RH} \quad (11)$$

Таким образом после измерений показателей, и можно вычислить калибровочную поправку ΔT_{4b} .

2. Калибровка VIIRS по показаниям MODIS. С учетом (2), (4) и (7) получим

$$2442,7 \cdot FRP = \sigma(\varepsilon \pm \Delta\varepsilon) T^4 \cdot RH \cdot 2,81 \cdot 10^4 \quad (12)$$

Из (12) находим

$$(\varepsilon \pm \Delta\varepsilon) = 8,66 \cdot 10^2 \frac{FRP}{\sigma \cdot T^4 \cdot RH} \quad (13)$$

Таким образом, при известных значениях ε , FRP , σ , T и RH можно определить калибровочную поправку $\pm\Delta\varepsilon$.

Следовательно, предлагаемые методы межсенсорной калибровки могут быть реализованы по следующему единому алгоритму:

1. Определение величин GFV_1 и GFV_2 по формулам (2) и (7), составление равенства

$$GFV_1 = GFV_2 \quad (14)$$

2. Определение калибруемого показателя путем добавления к его величине калибровочной аддитивной поправки.

3. Определение калибровочной поправки на основе равенства (14).

В целом, согласно [14], чем выше температура факела, тем полное сгорает углеводородный газ и тем меньше генерируется аэрозоль. В этой работе введено понятие коэффициента эмиссии ВС, зависящий от температуры факела. Соответствующий график зависимости коэффициента эмиссии $\omega(x)$ приведен на рис. 3. где на оси x – температура в К.

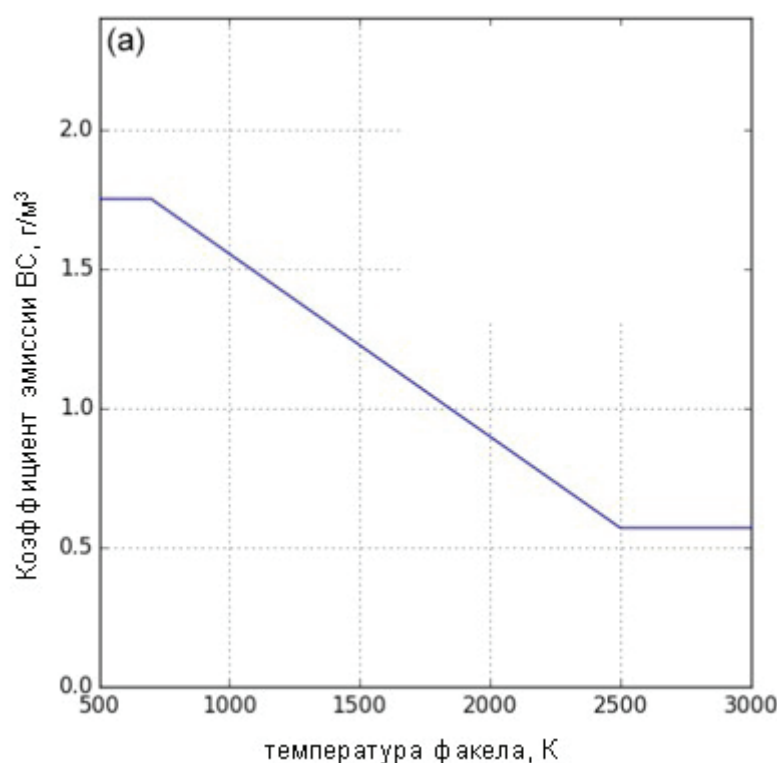


Рис. 3. График зависимости коэффициента эмиссии ВС от температуры факела

Fig. 3 Plot of emission factor BC versus flame temperature

При этом статистики температур сжигания факелов составленные по данным SLSTR и VIIRS почти одинаковы [14]. На рис. 4. Приведена гистограмма распределения температур сжигания газа в факелах [14].

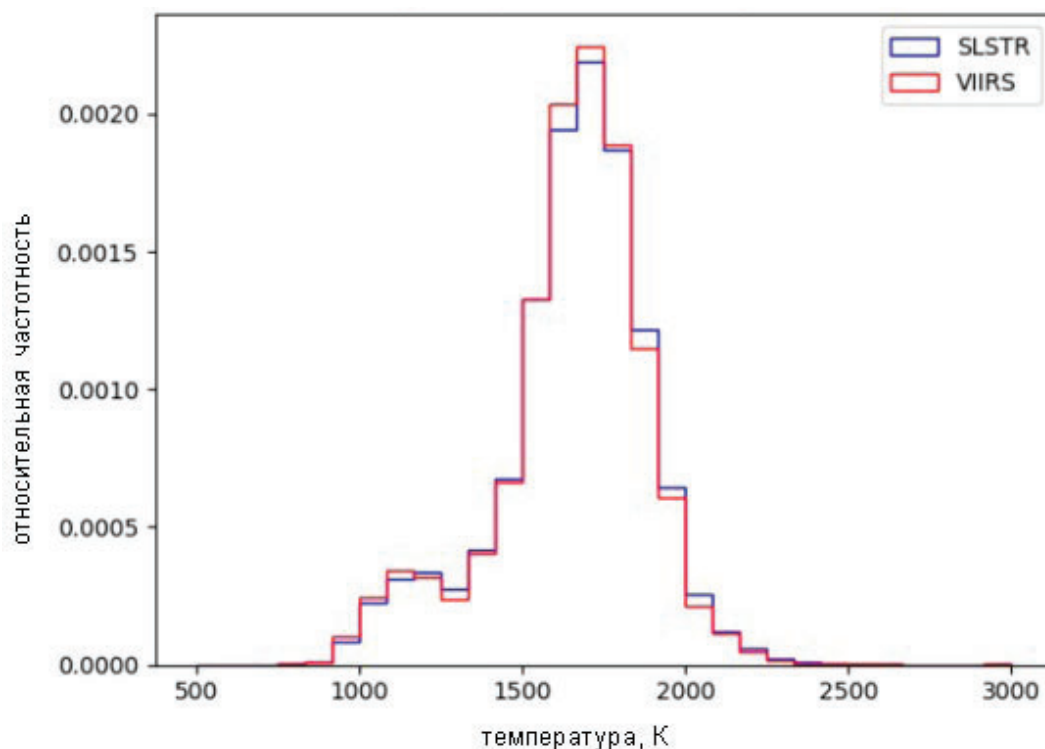


Рис. 4. Гистограмма распределения температур сжигания газа в факелах

Fig. 4 Histogram of distribution of gas combustion temperatures in flares

Как видно из гистограммы, приведенной на рис. 4 общий вид этой кривой напоминает сложение двух гауссовских кривых центрированных в точках $T = 1200\text{ K}$ и $T = 1700\text{ K}$.

Отсюда возникает следующая задача исследования: Следует определить, при какой средней температуре следует ожидать максимальную эмиссию ВС, если статистика частотности факелов полностью известна.

Далее, для проводимого анализа примем следующие исходные предположения:

1. Температура факелов рассматривается в качестве случайной величины являющейся суммой двух независимых случайных величин x_1, x_1 . При этом имеется в виду не алгебраическое суммирование, а статистическое суммирование, т.е. суммируются частотности появления этих двух случайных температур факелов.

2. Вышеуказанными двумя случайными величинами являются появление низкотемпературных факелов и появление высокотемпературных факелов.

3. Вводятся на рассмотрение случайные величины

$$z_1 = \omega(x_1) \cdot x_1 \quad (15)$$

$$z_2 = \omega(x_2) \cdot x_2 \quad (16)$$

где:

x_1 – случайная величина, показывающая появление низкотемпературного факела;

$\omega(x_1)$ – частотность появления низкотемпературного факела;

x_2 – случайная величина, показывающая появление высокотемпературного факела;

$\omega(x_2)$ – частотность появления высокотемпературного факела.

Хорошо известно, что плотность распределения вероятности двух независимых случайных величин определяется путем произведения соответствующих плотностей, т.е.

$$f_0(z_1, z_2) = f_1(z_1) \cdot f_2(z_2) \quad (17)$$

где f_1, f_2 – соответствующие плотности вероятности z_1 и z_2 .

С учетом (15) и (16), выражение (17) перепишем как

$$f_0(z_1, z_2) = f_1(\omega(x_1) \cdot x_1) \cdot f_2(\omega(x_2) \cdot x_2) \quad (18)$$

Целью исследования является определение такого соотношения между f_1 и f_2 при котором $f(z_1, z_2)$ достиг бы экстремальной величины. Взяв производную f_1 и f_2 по z_1 и z_2 соответственно и приравняв результат нулю получим

$$\frac{\partial f_0}{\partial f_1} \cdot \frac{df_1}{dz_1} + \frac{\partial f_0}{\partial f_2} \cdot \frac{df_2}{dz_2} = 0 \quad (19)$$

С учетом

$$\frac{\partial f_0}{\partial f_1} = f_2; \quad \frac{\partial f_0}{\partial f_2} = f_1 \quad (20)$$

Из (19) и (20) получаем

$$f_2 \cdot \frac{df_1}{dz_1} + f_1 \cdot \frac{df_2}{dz_2} = 0 \quad (21)$$

Из (21) можем написать

$$\frac{f_1'}{f_1} = -\frac{f_2'}{f_2} \quad (22)$$

Интегрируя левую и правую стороны (22) получим

$$\ln f_1 + \ln f_2 = C; \quad C = \text{const} \quad (23)$$

где: – постоянная интегрирования.

Из выражения (23) окончательно получим:

$$f_1 \cdot f_2 = C_1; \quad C_1 = \text{const} \quad (24)$$

или

$$f_1 = \frac{C_1}{f_2} \quad (25)$$

Следовательно, при выполнении условия (25) f_0 достигает экстремума тип которого (минимум или максимум) может быть определен при рассмотрении конкретных типов распределений.

Рассмотрим пример. Допустим, что f_1 и f_2 являются Гауссовскими функциями:

$$f_1 = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{z_1}^2}} \exp \left[-\left(\frac{z_1 - m(z_1)}{2\sigma_{z_1}} \right)^2 \right] \quad (26)$$

$$f_2 = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{z_2}^2}} \exp \left[-\left(\frac{z_2 - m(z_2)}{2\sigma_{z_2}} \right)^2 \right] \quad (27)$$

Очевидно, что в (19) $\frac{\partial f_0}{\partial f_1}$ и $\frac{\partial f_0}{\partial f_2}$ являются положительными величинами.

Вычислим производные $\frac{df_1}{dz_1}$ и $\frac{df_2}{dz_2}$. Имеем:

$$\frac{df_1}{dz_1} = \frac{-2}{\sqrt{2\pi\sigma_{z_1}^2}} \exp \left[-\left(\frac{z_1 - m(z_1)}{2\sigma_{z_1}} \right)^2 \right] \cdot \frac{(z_1 - m(z_1))}{2\sigma_{z_1}^2} \quad (28)$$

$$\frac{df_1^2}{dz_1^2} = \frac{-2 \cdot 2}{\sqrt{2\pi\sigma_{z_1}^2}} \left[\exp \left[-\left(\frac{z_1 - m(z_1)}{2\sigma_{z_1}} \right)^2 \right] \cdot \left[\frac{(z_1 - m(z_1))}{2\sigma_{z_1}^2} \right]^2 + \frac{\exp \left[-\left(\frac{z_1 - m(z_1)}{2\sigma_{z_1}} \right)^2 \right]}{2\sigma_{z_1}^2} \right] \quad (29)$$

Как видно из (29) $\frac{df_1^2}{dz_1^2}$ всегда отрицательна. Аналогично (28) можно показать, что $\frac{df_2^2}{dz_2^2}$ также всегда отрицательно.

Следовательно, при решении (25) функционал (18) достигает максимума. Это означает, что z значения, при котором эмиссия ВС была бы максимальной может быть вычислена с учетом (25), (26) и (27) из условия

$$\sqrt{\frac{2\pi\sigma_{z_2}^2}{2\pi\sigma_{z_1}^2} \exp \left[-\left(\frac{z_1 - m(z_1)}{2\sigma_{z_1}} \right)^2 + \left(\frac{z_2 - m(z_2)}{2\sigma_{z_2}} \right)^2 \right]} = C_1 \quad (130)$$

Таким образом, согласно (30) при наличии значений пяти величин из множества $\{\sigma_{z_1}, \sigma_{z_2}, m(z_1), m(z_2), z_1, z_2\}$ можно вычислить остальную шестую, при которой f_0 достигнет максимума, т.е. генерация ВС достигнет максимального значения. Эвристически ясно, что на практике этого вычисленного значения искомого показателя надо избегать, чтобы не допустить максимальной генерации аэрозоля типа ВС.

Заключение

Проанализированы существующие спутниковые методы оценки общего количества сжигаемого в факелах углеводородного попутного газа, реализуемые на базе данных MODIS и VIIRS. Предложены методы межсенсорной калибровки спутниковых показателей, предусматривающие внесение аддитивной калибровочной поправки на измеренную температуру объектов вне факела в первом случае, когда данные MODIS калибруются по показаниям VIIRS и на излучательность факела, в случае если показания VIIRS калибруются по данным MODIS. Рассмотрена и решена задача оптимального выбора температуры факелов газа, при котором эмиссия аэрозоля типа элементного углерода (ВС) может быть уменьшена по сравнению с максимальным уровнем генерации. Получено аналитическое выражение, позволяющее вычислить такие значения основных показателей факела, при которых уровень эмиссии аэрозоля мог бы достичь максимальной величины.

Литература

1. Elvidge C. D., Zhizhin M., Hsu F. C., Baugh K. E. VIIRS nightfire: satellite pyrometry at night// Remote Sens. 5. 4423-4449. doi:10.3390/rs5094423. 2013.
2. Ismail O. S., Umukoro G. E. Global impact of gas flaring, energy and power engineering. 4. 290-302. doi:10.4236/epe.2012.44039. 2012.

3. World Bank: Global Gas Flaring Reduction. <http://web.worldbank.org/WBSITE/EXTERNAL/TOPICS/EXTGGFR/0>. 2012.
4. Croft T. A. Night-time images of the earth from space// *Sci. Am.* 239. 68-79. 1978.
5. Muirhead K., Cracknell A. P. Identification of gas torches in the North Sea using satellite data// *Int. J. Remote Sens.* 5. 199-212. doi:10.1080/01431168408948798. 1984.
6. Elvidge C. D., Baugh K. E., Anderson S., Ghosh T., Ziskin D. Estimation of gas flaring volumes using NASA MODIS fire detection products// NOAA National Geophysical Data Center (NGDC). 2011.
7. Marchese F., Lacava T., Pergola N., Hattori K., Miraglia E., Tramutoli V. Inferring phases of thermal unrest at Mt. Asama (Japan) from infrared satellite observations// *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 237-238. 10-18. 2012.
8. Steffke A. M., Harris A. J. A review of algorithms for detecting volcanic hot spots in satellite infrared data// *B. Volcanol.* 73. 1109-1137. 2011.
9. Kaufman Y. J., Justice C. O., Flynn L. P., Kendall J. D., Prins E. M., Giglio L., Ward D. E., Menzel W. P., Setzer A. W. Potential global fire monitoring from EOS-MODIS// *J. Geo-phys. Res.* 103. 32215-32238. 1998.
10. Wooster M. J., Shukiv B., Oertel D. Fire radiative energy for quantitative study of biomass burning; derivation from the BIRD experimental satellite and comparison to MODIS fire products// *Remote Sens. Environ.* 86. 83-107. 2003.
11. Faruolo M., Coviello I., Filizzola C., Lacava T., Pergola N., Tramutoli V. A A satellite-based analysis of the Val d'Agri (South of Italy) oil center gas flaring emissions// *Natural Hazards and Earth System Sciences.* 2. 4101-4133. 2014. doi:10.5194/nhessd-2-4101-2014.
12. World Bank's Global. Methodology for determining the gas flare volumes from satellite data.
13. 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. 9. 14. <https://doi.org/10.3390/en9010014>.
14. Caseiro A., Gehrke B., Rücker G., Leimbach D., Kaiser J. Gas flaring activity and black carbon emissions in 2017 derived from Sentinel-3A SLSTR// <https://doi.org/10.5194/essd-2019-99>

References

1. Elvidge C. D., Zhizhin M., Hsu F. C., Baugh K. E. VIIRS nightfire: satellite pyrometry at night// *Remote Sens.* 5. 4423-4449. doi:10.3390/rs5094423. 2013.
2. Ismail O. S., Umukoro G. E. Global impact of gas flaring, energy and power engineering. 4. 290-302. doi:10.4236/epe.2012.44039. 2012.
3. World Bank: Global Gas Flaring Reduction. <http://web.worldbank.org/WBSITE/EXTERNAL/TOPICS/EXTGGFR/0>. 2012.
4. Croft T. A. Night-time images of the earth from space// *Sci. Am.* 239. 68-79. 1978.
5. Muirhead K., Cracknell A. P. Identification of gas torches in the North Sea using satellite data// *Int. J. Remote Sens.* 5. 199-212. doi:10.1080/01431168408948798. 1984.
6. Elvidge C. D., Baugh K. E., Anderson S., Ghosh T., Ziskin D. Estimation of gas flaring volumes using NASA MODIS fire detection products// NOAA National Geophysical Data Center (NGDC). 2011.
7. Marchese F., Lacava T., Pergola N., Hattori K., Miraglia E., Tramutoli V. Inferring phases of thermal unrest at Mt. Asama (Japan) from infrared satellite observations// *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 237-238. 10-18. 2012.
8. Steffke A. M., Harris A. J. A review of algorithms for detecting volcanic hot spots in satellite infrared data// *B. Volcanol.* 73. 1109-1137. 2011.
9. Kaufman Y. J., Justice C. O., Flynn L. P., Kendall J. D., Prins E. M., Giglio L., Ward D. E., Menzel W. P., Setzer A. W. Potential global fire monitoring from EOS-MODIS// *J. Geo-phys. Res.* 103. 32215-32238. 1998.
10. Wooster M. J., Shukiv B., Oertel D. Fire radiative energy for quantitative study of biomass burning; derivation from the BIRD experimental satellite and comparison to MODIS fire products// *Remote Sens. Environ.* 86. 83-107. 2003.
11. Faruolo M., Coviello I., Filizzola C., Lacava T., Pergola N., Tramutoli V. A A satellite-based analysis of the Val d'Agri (South of Italy) oil center gas flaring emissions// *Natural Hazards and Earth System Sciences.* 2. 4101-4133. 2014. doi:10.5194/nhessd-2-4101-2014.

12. World Bank's Global. Methodology for determining the gas flare volumes from satellite data.
13. 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. 9. 14. <https://doi.org/10.3390/en9010014>.
14. Caseiro A., Gehrke B., Rücker G., Leimbach D., Kaiser J. Gas flaring activity and black carbon emissions in 2017 derived from Sentinel-3A SLSTR// <https://doi.org/10.5194/essd-2019-99>

Сведения об авторах

АСАДОВ И.Х. – докторант Национального аэрокосмического агентства Республики Азербайджан. г. Баку, Республика Азербайджан.

E-mail: asadzade@rambler.ru

ASADOV I.Kh. – doctoral student, National Aerospace Agency of the Republic of Azerbaijan. Baku, Republic of Azerbaijan.

ДАНИЛОВ Юрий Георгиевич – заместитель ректора СВФУ по вопросам устойчивого развития арктических территорий, профессор ИЕН СВФУ, к.г.н., доцент. г. Якутск, Российская Федерация.

E-mail: dan57sakha@mail.ru

DANILOV Yuri Georgievich – Deputy Rector for Sustainable Development of the Arctic Territories, Professor, Institute of Natural Sciences, Ammosov North-Eastern Federal University, Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor. Yakutsk, Russian Federation