

MONITORING OF NATURAL GAS FLARING IN THE TERRITORY OF WESTERN SIBERIA WITH THE USE OF THE VISIBLE AND NEAR INFRARED CHANNEL READINGS OF VIIRS/SNPP AT NIGHT-TIME

Egor Yu. Mordvin¹, Anatoly A. Lagutin^{1,2}, Maksim S. Trishin¹

¹Altai State University, Barnaul, Russia

²Institute of Computational Technologies SB RAS, Novosibirsk, Russia

Abstract

We discuss a monitoring technology of gas flaring in the Western Siberia territory. The technology is based on visible and near infrared channel readings of VIIRS/SNPP at night-time. Using VIIRS data collected in 2015, we found and cataloged 233 sources.

Keywords: Western Siberia, high-temperature sources, Suomi-NPP, VIIRS, characteristics of gas flaring

МОНИТОРИНГ ФАКЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК ПО СЖИГАНИЮ ПОПУТНОГО ГАЗА НА ТЕРРИТОРИИ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ КАНАЛОВ РАДИОМЕТРА VIIRS/SNPP В ВИДИМОМ И БЛИЖНЕМ ИК-ДИАПАЗОНАХ В НОЧНОЕ ВРЕМЯ

Мордвин Е.Ю.⁽¹⁾, Лагутин А.А.⁽¹⁾⁽²⁾, Гришин М.С.⁽¹⁾

¹ Алтайский государственный университет, Барнаул

² Институт вычислительных технологий СО РАН, Новосибирск

Обсуждается технология мониторинга характеристик факельных установок по сжиганию попутного нефтяного газа на территории Западной Сибири, основанная на данных каналов видимого и ближнего инфракрасного диапазонов радиометра VIIRS/Suomi-NPP в ночное время. В по данным VIIRS для 2015 г. найдено и каталогизировано 233 источника.

Ключевые слова: Западная Сибирь, высокотемпературные источники, Suomi-NPP, VIIRS, характеристики факельных установок.

Введение. В процессе подготовки и добычи нефти на каждом месторождении выделяется попутный нефтяной газ (ПНГ). Часть этого газа сжигается в факельных установках (ФУ) в местах добычи нефти, а также на других этапах переработки нефти. В работе [1] по данным спутниковых наблюдений в 2012 г. установлено 7467 ФУ. Лидерами по числу ФУ являются США (2399), Россия (1053), Канада (332), Нигерия (325) и Китай (309). Однако, по объему сжигаемого ПНГ распределение другое: Россия, Ирак, Иран, Нигерия, Венесуэла, США [1]. По оценкам [1] в 2012 г. в ФУ было сожжено около 140 миллиардов кубометров газа, что составило почти 3.5% его годового мирового производства. Вклад России был около 17%, доля США – 4.5%.

Сжигание ПНГ приводит к выбросам в атмосферу парниковых газов (CO₂, метан), окиси азота, сернистого ангидрида, сажи и других токсичных компонентов, а также к тепловому воздействию на подстилающую поверхность (ПП) (см., например, [2-5]). Эти выбросы оказывают влияние на климат, характеристики окружающей среды и состояние здоровья людей как в глобальном масштабе, так и на региональном уровне [2,5,6]. В силу отсутствия регулярных и полных данных по расположению ФУ и их функционированию для оценки воздействия ФУ на биосферу Земли необходимо проведение мониторинга характеристик ФУ, а также системы «атмосфера – ПП» в зоне их расположения.

Продолжая исследования [1,2,4-12], главной целью данной работы является обсуждение технологии обнаружения высокотемпературных аномалий и их характеристик (координаты, температура, площадь) с использованием данных каналов видимого и ближнего инфракрасного диапазонов радиометра VIIRS (Visible Infrared Imaging Radiometer Suite) [13] в ночное время, а также установление характеристик ФУ Западной Сибири в 2015 г. и первой половине 2017 г. Информационной основой работы являлся «сырой поток» данных радиометра VIIRS, принимаемый в режиме реального времени наземной станцией УниСкан-24 в Алтайском государственном университете, и создаваемые на его основе продукты уровня 1 и 2.

Радиометр VIIRS/Suomi-NPP. Радиометр VIIRS входит в состав аппаратуры космической платформы Suomi-NPP [14], которая была запущена 28 октября 2011 года. Прибор имеет 22 спектральных канала, регистрирующих уходящее из атмосферы электромагнитное излучение в диапазоне 0,412-11.45 мкм [13]. В отличие от большинства приборов, используемых для мониторинга термальных аномалий, несколько каналов видимого и ближнего ИК-диапазонов этого радиометра, которые представлены в таблице 1 по данным [13], регистрируют уходящее из атмосферы излучение в ночное время суток. В [10] было установлено, что показания этих каналов, превышающие порог шумов канала, могут быть эффективно использованы не только для обнаружения высокотемпературных термальных источников, но также и для восстановления их температуры и площади.

Таблица 1. Характеристики каналов VIIRS, регистрирующие уходящее излучение в ночное время.

Канал	Диапазон длин волн (мкм)	Максимум чувствительности (мкм)	Размер пикселя (км×км)
DNB	0.500 – 0.900	0.700	0.742×0.742
M7	0.846 – 0.885	0.865	0.742×0.259
M8	1.230 – 1.250	1.240	0.742×0.776
M10	1.580 – 1.640	1.610	0.742×0.776

Физическая основа метода. Физической основой метода восстановления температуры термальной аномалии является утверждение о том, что в темное время суток весь поток электромагнитной энергии, уходящей в космическое пространство в ближнем ИК-диапазоне, является, в основном, собственным излучением этого источника. В силу этого можно считать, что регистрируемая радиометром VIIRS в этих каналах интенсивность излучения без учета атмосферной коррекции равна произведению функции Планка при температуре источника и масштабирующего множителя ε , который, в основном, несет информацию о доле пикселя, занятой аномалией. Эта интенсивность может быть представлена в виде:

$$L(\lambda, T) = B(\lambda, T)\varepsilon = \varepsilon \frac{4\pi h C^2}{\lambda^5 \left(e^{\frac{2\pi h C}{\lambda k T}} - 1 \right)}. \quad (1)$$

На рис. 1 показаны распределения Планка для нескольких температур источника, исследуемых в данной работе. Вертикальными линиями на этом рисунке также обозначены каналы VIIRS, работающие в ночное время. Хорошо видно, что каналы M8 и M10 находятся в области максимума интенсивности излучения источников, температура которых лежит в диапазоне 1800 – 2200 К.

Алгоритм восстановления. Основой создаваемого вычислительного комплекса обнаружения высокотемпературных термальных аномалий и их характеристик по данным каналов видимого и ближнего инфракрасного диапазонов радиометра VIIRS в ночное время является алгоритм [10]. Этот алгоритм включает два этапа обработки. На первом этапе находятся координаты возможных термальных аномалий, на втором — восстанавливаются их характеристики.

Данные VIIRS показали [10], что отклик канала M10, превышающий шумы канала в пикселе на уровне шести среднеквадратичных отклонений для анализируемой сцены, указывают на наличие в нем термальной аномалии. Именно этот пороговый критерий использовался в работе для начала поиска аномалий. После превышения в данном пикселе аналогичных пороговых значений также и в каналах M8 и DNB, ему присваивалась метка «термальная аномалия».

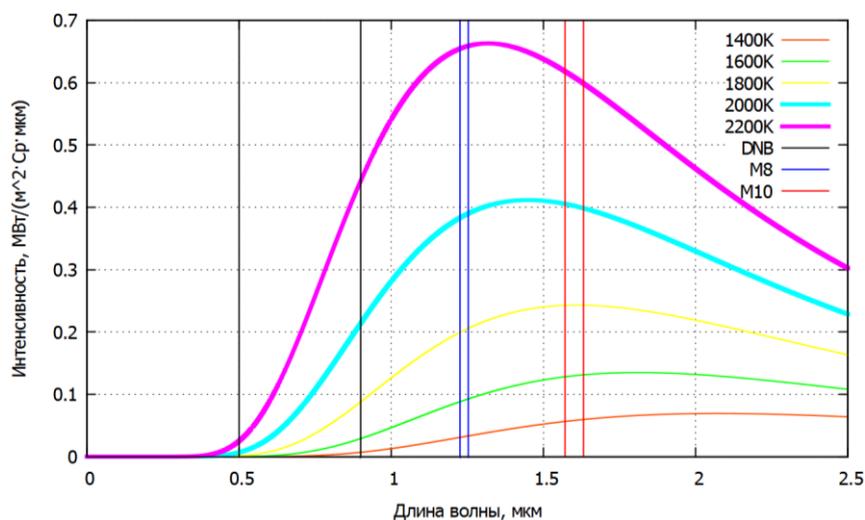


Рис. 1. Распределения Планка для нескольких температур источника; вертикальными линиями показаны каналы VIIRS, работающие в ночное время.

После установления пикселей, имеющих метку «термальная аномалия», восстанавливалась температура T источника и коэффициент масштабирования ε . Для этого, как было предложено в [10], использовалась процедура фитирования (1) на основе метода многомерной оптимизации Нелдера-Мида [15].

Для старта этапа восстановления температуры и площади источника необходимо задавать начальные значения температуры T_0 , коэффициента масштабирования ε_0 , а также четыре параметра метода многомерной оптимизации Нелдера-Мида [15]: отражения (ρ), растяжения (χ), сжатия (γ) и редукции (σ). На стадии тестирования текущего блока было установлено, что оптимальными для старта являются следующие начальные значения: $T_0 = 500$ К и $\varepsilon_0 = 0.1$, $\rho = 1$, $\chi = 2$, $\gamma = 0.4$, $\sigma = 0.6$.

После определения коэффициента масштабирования ε оценивалась площадь источника с использованием равенства $S = \varepsilon \Delta A \Delta D$. Входящие в это выражение размеры пикселя вдоль направлений сканирования ΔA и в направлении движения спутника ΔD определялись с использованием выражений (4)-(6) работы [10].

Верификация. Верификация созданного на базе этого алгоритма вычислительного комплекса проводилась, подобно [10], с использованием искусственного источника, состоящего из 39 ксеноновых коротко-дуговых ламп [16]. Излучение этих ламп сфокусировано в единый луч, который направлен перпендикулярно вверх. Источник имеет координаты $36^{\circ}05'44''$ с.ш., $115^{\circ}10'33''$ з.д. Температура источника равна 6000 К, его площадь 0.2 м². Отметим, что максимум излучения этого источника приходится на видимую часть спектра.

Для верификации комплекса были использованы результаты ночной съемки VIIRS, проведенные 7 июля 2013 года. Необходимые данные были получены из ресурса <https://www.class.ncdc.noaa.gov>.

Сопоставление показало, что полученные с использованием созданного вычислительного комплекса температура и площадь практически совпадает с действительными характеристиками источника.

Высокотемпературные источники на территории Западной Сибири. Созданный на базе изложенного выше алгоритма вычислительный комплекс был применен для поиска высокотемпературных ($T > 1600$ К) источников на территории Западной Сибири в 2015 и 2017 годах. Информационной базой работы являлся «сырой поток» данных радиометра VIIRS, принимаемый авторами в режиме реального времени наземной станцией УниСкан-24, и создаваемые на его основе продукты уровня 1 и 2.

В исследованиях использовались лишь ночные измерения VIIRS с зенитным углом наблюдений $< 10^{\circ}$ в условиях безоблачной атмосферы. Пиксели, закрытые облаками, определялись по маске облачного покрова, восстанавливаемого по данным VIIRS. В результате обработки данных 2015 г. было обнаружено 233 аномалии, пространственное распределение которых показано на рис. 2. Источники, которые были зарегистрированы один раз, исключены.

Анализ полученных данных показал, что в период действия установленных источников их температура находилась в диапазоне 1600-2000 К. Поскольку этот диапазон соответствует температурам горения газовой смеси на основе легких углеводородов, было высказано предположение, что эти источники — факельные установки.

Для более детальной классификации источников использовались данные геоинформационной системы Google Earth [17], а также данные спутника Landsat-8 [18]. Визуальный анализ снимков показал, что большинство найденных источников являются факельными установками.

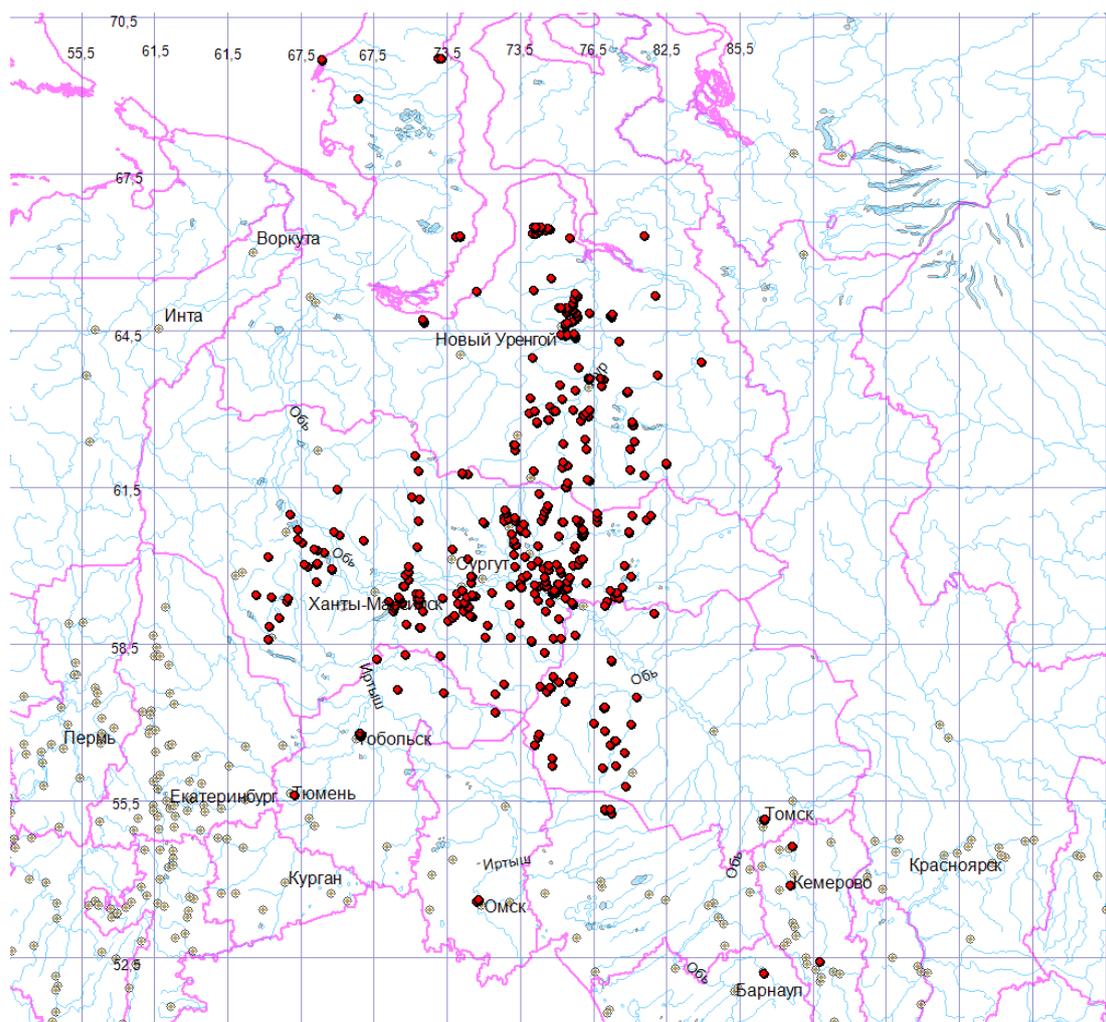


Рис. 2. Пространственное распределение высокотемпературных ($T > 1600$ К) источников на территории Западной Сибири в 2015 г.

Выводы. 1. Создан и верифицирован вычислительный комплекс обнаружения высокотемпературных термальных аномалий и их характеристик (температура, площадь) в условиях безоблачной атмосферы с использованием данных каналов видимого и ближнего инфракрасного диапазона радиометра VIIRS/SNPP в ночное время.

2. По данным VIIRS/SNPP был проведен поиск высокотемпературных ($T > 1600$ К) аномалий на территории Западной Сибири. В 2015 г. найдено и каталогизировано 233 источника. Визуальный анализ снимков высокого разрешения области источника показал, что большинство найденных источников являются факельными установками. Характеристики этих источников представлены в докладе.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Elvidge C. D., Zhizhin M., Baugh K. et al. Methods for global survey of natural gas flaring from Visible Infrared Imaging Radiometer Suite data // *Energies*, 2016. Vol. 9. Doi:10.3390/en9010014.
- [2] Elvidge C.D., Ziskin, D., Baugh, K.E. et al. Fifteen year record of global natural gas flaring derived from satellite data // *Energies*, 2009. Vol. 2. P. 595–622.
- [3] Ismail O., Umukoro G. Global impact of gas flaring // *Energy Power Eng.*, 2012. Vol. 4. P. 290–302.
- [4] Casadio S., Arino, O., Serpe, D. Gas flaring monitoring from space using the ATSR instrument series // *Remote Sens. Environ.*, 2012. Vol. 116. P. 239–249.
- [5] Sharma A., Wang J., Lennartson E.M. Intercomparison of MODIS and VIIRS fire products in Khanty-Mansiysk Russia: Implications for characterizing gas flaring from space // *Atmosphere*, 2017. Vol. 8. 95. doi:10.3390/atmos8060095.

- [6] Anejiou O.C.D., Blackburn G.A., Whyat J.D. Satellite survey of gas flares: development and application of a Landsat-based technique in the Niger Delta // *Int. J. Remote Sens.*, 2014. Vol. 35. P. 1900-1925.
- [7] Грибанов К.Г., Захаров В.И., Алсынбаев К.С., Суляев Я.С. Метод определения расхода попутного газа на факелах по данным спутникового зондирования сенсорами типа MODIS в ИК каналах // *Оптика атмосферы и океана*, 2007. Т. 20. С. 68-72.
- [8] Годунов А.И., Жижин М.Н. Метод оценки объемов сжигаемого газа по данным дистанционного зондирования // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, 2011. Т. 8. №. 1. С. 83-89.
- [9] Алсынбаев К.С., Брыксин В.М., Евтюшкин А.В. и др. Оценка мощности факельных установок по сжиганию попутного нефтяного газа на основе обработки космоснимков MODIS // *Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта*, 2013. Т. 10. С. 131-137.
- [10] Elvidge C.D., Zhizhin M., Hsu F.-C. et al. VIIRS Nightfire: Satellite pyrometry at night // *Remote Sens.*, 2013. Vol. 5. P. 4423-4449.
- [11] Zhizhin M., Elvidge C.D., Hsu F.-C. et al. Using the short-wave infrared for nocturnal detection of combustion sources in VIIRS data // *Proc. Asia-Pacific Adv. Netw.*, 2013. Vol. 35, P. 49-61.
- [12] Жижин М.Н., Элвидж К., Пойда А.А. и др. Использование данных ДЗЗ для мониторинга добычи углеводородов // *Информационные технологии и вычислительные системы*, 2014. Т. 3. С. 97-111.
- [13] Hillger D., Kopp T., Lee T. et al. First-light imagery from Suomi NPP VIIRS // *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 2013. Vol. 94. P. 1019–1029.
- [14] Powell A. M. Jr., Weng F. Introduction to special section on Suomi National Polar-Orbiting Partnership satellite calibration, validation, and applications // *J. Geophys. Res. Atmos.*, 2013. Vol. 118. P. 12216–12217.
- [15] Lagarias J.C., Reeds J.A., Wright M.H., Wright P.E. Convergence properties of the Nelder-Mead simplex method in low dimensions // *SIAM J. Optim.*, 1988. Vol. 9. P. 112-147.
- [16] Xenon Short Arc Lamps. <http://www.sqpuv.com/PDFs/TechnicalSpecificationGuide.pdf> (дата обращения 17.05.2015).
- [17] Google Earth. <https://www.google.com/earth> (дата обращения 22.05.2017).
- [18] USGS Earth Explorer. <https://earthexplorer.usgs.gov> (дата обращения 25.05.2017).