

## Оценка объёмов сжигания попутного газа на территории нефтедобычи по спутниковым снимкам Landsat-8

Г. А. Кочергин<sup>1</sup>, М. А. Куприянов<sup>1</sup>, Ю. М. Полищук<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Югорский НИИ информационных технологий, Ханты-Мансийск, 628011, Россия  
E-mail: gak@urit.ru

<sup>2</sup> Институт химии нефти СО РАН, Томск, 634021, Россия  
E-mail: yupolishchuk@gmail.com

Рассмотрены методические вопросы оперативной оценки объёмов факельного сжигания попутного нефтяного газа на нефтяных месторождениях по спутниковым снимкам среднего разрешения. Важность оценки объёмов сжигания попутного газа связана не только с возможностью организации оперативного мониторинга объёмов сжигаемого газа на нефтедобывающих территориях, но и с необходимостью оценки вклада в глобальный парниковый эффект выбросов двуокиси углерода в атмосферу при факельном сжигании попутного газа. Применена разработанная ранее методика определения числа факельных установок (ФУ) на территории по космическим снимкам Landsat-8, основанная на применении предложенного авторами нормализованного индекса тепловых точек. Предложено уравнение, позволяющее рассчитывать ожидаемые объёмы сжигания газа в зависимости от числа работающих на территории ФУ с использованием официальных данных о суммарных объёмах сожжённого попутного газа на территории Ханты-Мансийского автономного округа и о количестве ФУ на этой территории, определённом по космическим снимкам. Проведён анализ погрешности разработанной модели оценивания суммарных квартальных объёмов сжигания газа по данным о числе ФУ на территории нефтедобычи. Показано, что эта величина в среднем не превышает 10 %. Модель может быть применена в задачах спутникового мониторинга объёмов сжигаемого газа с использованием космических снимков Landsat-8.

**Ключевые слова:** факельные установки, космические снимки, спутниковый мониторинг, попутный нефтяной газ, сжигание газа на нефтяных месторождениях, нормализованный индекс тепловых точек, парниковый эффект

Одобрена к печати: 05.10.2020

DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-5-53-60

### Введение

В связи с очевидными опасностями продолжающегося глобального потепления климата Парижский климатический саммит (2015) принял рекомендацию государствам мира разработать мероприятия по ослаблению парникового эффекта с целью не допустить повышения среднегодовой температуры на Земле к середине нынешнего столетия более чем на 2 °С. Известно, что при сжигании попутного нефтяного газа (ПНГ) нефтедобывающих регионов России в атмосферу выбрасываются большие объёмы экологически опасных продуктов сгорания (сажа, оксиды азота, ароматические углеводороды, тяжёлые металлы) и углекислого газа (CO<sub>2</sub>), который вносит наибольший вклад в парниковый эффект.

По приблизительным оценкам экспертов (Верёвкин, Селезнев, 2015), из ежегодно добываемых в России 60 млрд м<sup>3</sup> ПНГ до трети этого объёма сжигается в факельных установках (ФУ) на месторождениях, при этом при сжигании 400 м<sup>3</sup> газа в среднем в атмосферу выделяется около одной тонны CO<sub>2</sub>. Поэтому для разработки на ближайшие годы мероприятий по снижению выбросов углекислого газа в результате факельного сжигания ПНГ необходимо иметь достаточно надёжные оценки суммарного объёма сжигаемого газа на территориях нефтедобывающих регионов. В работе (Кочергин и др., 2019) предложен подход к оценке объёмов сжигания газа на нефтедобывающей территории, основанный на анализе временного ряда квартальных фактических объёмов сожжённого газа на территории нефтедобычи. В цитированной работе разработана методика, позволяющая формировать оценки объёмов сжигания газа с погрешностью около 6 %. Однако для использования этого метода необходимы

достаточно длинные временные ряды объёмов сжигания ПНГ, которые в настоящее время для большинства российских нефтедобывающих регионов отсутствуют. В таком случае в качестве перспективного решения этой проблемы может рассматриваться применение данных дистанционного зондирования (ДДЗ), получаемых с космических аппаратов.

В публикации (Chowdhury et al., 2014) предложен метод выявления факельных установок по дневным космическим снимкам Landsat-8, основанный на использовании алгоритма SMACC (*англ.* Sequential Maximum Angle Convex Cone). В работе (Elvidge et al., 2015) исследована возможность обнаружения тлеющих торфяников по ночным космическим снимкам Landsat-8. Для обнаружения действующих пожаров и других открытых очагов горения по дневным космическим снимкам Landsat-8 в статье (Kumar, Roy, 2018) предложен алгоритм GOLI (*англ.* Global Operational Land Imager), а также проведено сравнение с другими аналогичными алгоритмами. Авторы публикации (Kato et al., 2018) описывают метод, позволяющий по ночным космическим снимкам Landsat-8 определять яркостную температуру и площадь открытого пламени, имеющего субпиксельный размер (меньший, чем пространственное разрешение снимка). В исследованиях (Грибанов и др., 2007; Elvidge et al., 2016) рассматриваются вопросы оценки объёма сжигаемого газа на отдельных ФУ с использованием информации об их яркости, полученной по космическим снимкам. Однако методы, изложенные в работах (Грибанов и др., 2007; Elvidge et al., 2016), ориентированы на использование снимков низкого пространственного разрешения, которые не позволяют отдельно регистрировать близкорасположенные факельные установки.

Наиболее приемлемым, по нашему мнению, представляется подход к оценке территориального объёма сжигаемого газа, основанный на учёте установленной нами (Кочергин и др., 2017) зависимости суммарных объёмов сжигания газа на территории от количества действующих на данной территории ФУ, определяемого по космическим снимкам среднего разрешения. Цель настоящей работы состоит в изложении методических вопросов оценки суммарного объёма сжигаемого газа на территории нефтедобывающего региона по космическим снимкам среднего разрешения.

## Методы и данные

Для проведения исследований выбрана территория важнейшего нефтедобывающего региона — Ханты-Мансийского автономного округа (ХМАО), для которого имеются временные ряды суммарных объёмов сжигаемого газа, позволяющие определять погрешности оценки этих объёмов по спутниковым данным о количестве факельных установок. Дадим ниже краткую характеристику использованных в работе данных. Для определения числа ФУ на территории ХМАО использовались космические снимки среднего пространственного разрешения со спутника Landsat-8. Этот спутник, введённый в эксплуатацию в 2013 г., оснащён двумя сенсорами, первый (OLI — *англ.* Operational Land Imager) проводит съёмку в девяти спектральных каналах видимого, ближнего и коротковолнового инфракрасного диапазонов, второй (TIRS — *англ.* Thermal Infrared Sensor) — в двух тепловых инфракрасных каналах. В настоящей работе использовались растровые изображения 4-го, 5-го, 7-го и 11-го спектральных каналов. Пространственное разрешение снимков в 4-м, 5-м и 7-м каналах составляет 30 м, а в 11-м канале — 100 м. Ширина полосы захвата сенсоров равна 185 км. Периодичность съёмки составляет 16 сут.

В качестве данных о фактических объёмах сжигаемого ПНГ были использованы материалы отчётов Департамента недропользования и природных ресурсов Ханты-Мансийского автономного округа, размещаемые на официальном сайте (<https://depnedra.admhmao.ru/deyatelnost/>), которые содержат ежеквартальные статистические данные о суммарных объёмах сжигаемого ПНГ на всей территории автономного округа.

Количество действующих факельных установок на нефтедобывающей территории определяется по космическим снимкам с использованием нормализованного индекса тепловых точек (Normalized Heat Point Index — NHPI), предложенного в работе (Кочергин и др., 2017) на основе модификации нормализованного индекса гарей (Normalized Burn Ratio — NBR)

(López García, Caselles, 1991). Разработанная нами в публикации (Кочергин и др., 2017) методология дистанционного определения количества действующих факельных установок на нефтедобывающей территории по космическим снимкам предполагает выполнение следующей последовательности процедур:

- 1) предварительная обработка космических снимков;
- 2) выявление термических точек;
- 3) идентификация ФУ.

Для проведения предварительной обработки космических снимков Landsat-8 применялся алгоритм Landsat Level-1 Data Product, опубликованный на официальном сайте Геологической службы США (United States Geological Survey — USGS), — поставщика космических снимков со спутника Landsat-8 (<https://www.usgs.gov/land-resources/nli/landsat/using-usgs-landsat-level-1-data-product>). Более подробное описание процедуры выявления термических точек дано в работе (Кочергин и др., 2017), согласно которому величина нормализованного индекса тепловых точек рассчитывается по формуле:

$$\text{NHPI} = \frac{1}{2} \left( \frac{B4 - B7}{B4 + B7} + \frac{B5 - B7}{B5 + B7} \right),$$

где  $B4$ ,  $B5$  и  $B7$  — значения пикселей предварительно обработанных изображений в 4-м, 5-м и 7-м спектральных каналах соответственно.

Согласно публикации (Кочергин и др., 2017), значения индекса NHPI изменяются в диапазоне от  $-1$  до  $+1$ .

## Результаты

Описанная в работе (Кочергин и др., 2019) процедура выявления термических точек была реализована в виде программного комплекса «Автоматизированная система выделения термических точек на основе космических снимков Landsat-8» (Куприянов, 2015), зарегистрированного в Роспатенте. Результатом работы процедуры выступает картографированное поле термических точек, представляющих факельные установки (Кочергин и др., 2017), очаги пожаров (Schroeder et al., 2016) и другие объекты с аномально высокой температурой на исследуемой территории. Далее выполняется процедура идентификации ФУ, в рамках которой отнесение контура термической точки к факельной установке проводится совмещением со снимками высокого/сверхвысокого пространственного разрешения («Канопус-В», «Ресурс-П», GeoEye и др.), позволившим выявлять с их помощью явные признаки факельной установки (обваловка, пламя и др.).

Рассмотрим вопросы разработки методических аспектов оценивания объёмов сжигаемого газа. Данные об объёмах сжигаемого газа, заимствованные из отчётов Департамента недропользования и природных ресурсов ХМАО, и о динамике количества ФУ, определённого в соответствии с изложенной методикой по снимкам Landsat-8 на исследуемой территории, представлены на *рис. 1* (см. с. 56) в виде графика зависимости объёмов сожжённого ПНГ от числа ФУ. Точками на графике отображается объём газа, сожжённого в соответствующем квартале, и число выявленных ФУ в том же квартале.

В результате регрессионного анализа данных на *рис. 1*, проведённого с использованием программного приложения MS Excel, найдено (с достаточно высоким уровнем коэффициента детерминации  $R^2 = 0,66$ ) уравнение линейной регрессии, связывающее квартальный объём сожжённого ПНГ ( $y$ ) с количеством факельных установок ( $x$ ) в виде:

$$y = 2,2622x + 86,707. \quad (1)$$

Прямая линия на *рис. 1* отображает линейную зависимость объёмов сожжённого ПНГ от количества действующих ФУ в виде отношения (1). Следовательно, существует сильная корреляционная связь между количеством ФУ и объёмом сожжённого газа. Обнаруженная

закономерность представляется основой для расчёта объёмов сжигания газа по данным о количестве ФУ, определённом по космическим снимкам.

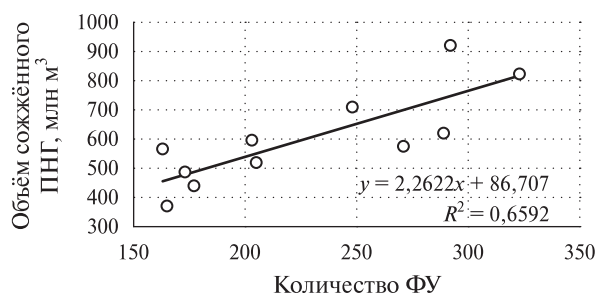


Рис. 1. Зависимость объёма сжигаемого газа от количества факельных установок

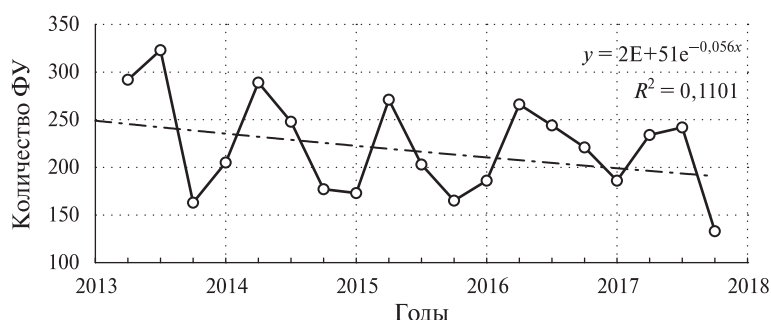


Рис. 2. Динамика количества факельных установок

На рис. 2 представлен график временного хода количества факельных установок, обнаруженных на территории ХМАО по космическим снимкам Landsat-8. Точки на графике, соединённые сплошной линией, показывают число ФУ, действующих на территории в каждом квартале. Штрихпунктирная линия представляет график экспоненциального тренда временных изменений числа ФУ, уравнение которого приведено в поле рисунка. Анализ данных на рис. 2 также показал, что наряду с экспоненциальным трендом наблюдаются циклические сезонные вариации объёма сжигаемого газа. Предложена расчётная формула оценки объёма сожжённого газа в виде суммы двух слагаемых, первое из которых выступает уравнением экспоненциального тренда, а второе слагаемое предназначено для учёта циклических сезонных колебаний объёмов сжигания. В связи с вышеизложенным уравнение для расчёта объёма сожжённого газа в  $i$ -м квартале имеет следующий вид:

$$V_{pi} = (2,9829 \cdot 10^{202} e^{-0,228t}) \cdot (1 + \Delta_i), \quad (2)$$

где  $t$  — время, выраженное как год, кварталы которого показаны дробной частью (например, 2012,0 — первый квартал 2012 г., 2012,75 — четвёртый квартал 2012 г. и т.д.);  $\Delta_i$  — относительное отклонение количества ФУ в  $i$ -м квартале, определяемое по формуле:

$$\Delta_i = \frac{N_{pi} - N_{\Phi i}}{N_{\Phi i}},$$

где  $N_{\Phi i}$  — фактическое количество ФУ в  $i$ -м квартале;  $N_{pi}$  — расчётное количество ФУ в  $i$ -м квартале, которое рассчитывалось по формуле:

$$N_{pi} = (2,11721 \cdot 10^{51} e^{-0,056t}).$$

На рис. 3 (см. с. 57) представлен график временного хода объёмов сжигаемого ПНГ на территории ХМАО, включающий три периода: исторический, контрольный и расчётный (оценочный). Точками на графике изображены ежеквартальные объёмы сжигания газа.

На графике приняты следующие обозначения: сплошная линия с полыми кружочками — фактические данные; штрихпунктир — линия экспоненциального тренда; квадратиками обозначены расчётные данные в соответствии с формулой (2).

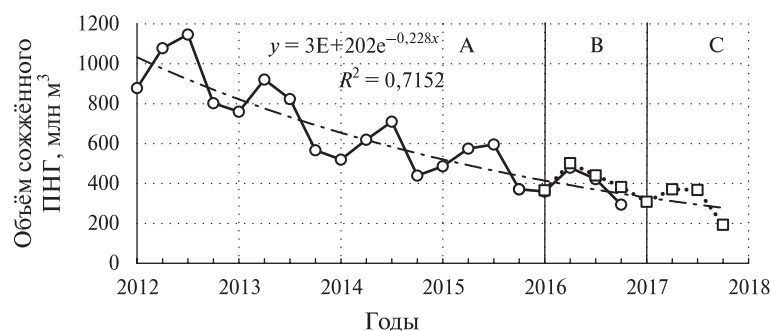


Рис. 3. Фактические и расчётные объёмы сожжённого ПНГ по данным о количестве ФУ, определённом по космическим снимкам: А — исторический период; В — контрольный период; С — расчётный период

Для оценки погрешности в контрольный период В (см. рис. 3) проведено сопоставление фактических и расчётных объёмов сожжённого газа. В качестве контрольной выборки были использованы фактические данные об объёмах сожжённого газа за период с 1-го по 4-й квартал 2016 г. Результаты расчёта объёмов сжигания газа по формуле (3) для этого же периода представлены в таблице.

Данные о фактических и расчётных объёмах сжигаемого газа в 2016 г.

Квартал	Фактический объём сожжённого ПНГ, млн м <sup>3</sup>	Расчётный объём сожжённого ПНГ, млн м <sup>3</sup>	Оценка погрешности расчёта, %
1	360	366,29	2
2	479	501,75	5
3	422	440,84	4
4	294	382,45	30

Относительная погрешность оценки объёма сожжённого ПНГ по данным о количестве ФУ определена по стандартной формуле:

$$\delta = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left| \frac{V_{pi} - V_{\phi i}}{V_{\phi i}} \right|,$$

где  $V_{pi}$  и  $V_{\phi i}$  — расчётный и фактический объём сожжённого газа соответственно;  $m$  — объём контрольной выборки,  $m = 4$ .

Расчёт показал, что величина  $\delta$  составила 10 %, что становится практически приемлемым значением. Полученные результаты могут быть использованы при разработке вопросов прогнозирования объёмов сжигания газа на месторождениях в нефтедобывающих регионах по космическим снимкам в случаях, когда в регионах отсутствуют данные о фактических объёмах сжигания ПНГ.

## Заключение

Проведённый анализ временного ряда объёма факельного сжигания попутного нефтяного газа (ПНГ) на территории нефтедобычи в ХМАО за период 2012–2016 гг. позволил установить, что тренд снижения объёмов сжигаемого газа за указанный период описывается с высоким

коэффициентом детерминации экспоненциальным уравнением. Установлено, что наряду с экспоненциальным трендом наблюдаются циклические сезонные вариации объёма сжигаемого газа.

Предложена расчётная формула для оценки объёма сжигаемого газа в виде суммы двух слагаемых: первое — уравнение экспоненциального тренда, а второе слагаемое предназначено для учёта сезонного колебания объёмов сжигания. Коэффициенты расчётного уравнения определялись по официальным данным о суммарных квартальных объёмах сжигаемого газа в период с 2012 по 2015 г. с сайта Департамента недропользования ХМАО. Показано, что погрешность оценки объёма сожжённого газа по спутниковым данным о числе факельных установок для сжигания ПНГ на территории ХМАО с использованием предложенной методики составляет 10 %.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке вопросов прогнозирования объёмов сжигания газа на месторождениях на основе космических снимков и в других нефтедобывающих регионах со сходными геолого-географическими и природно-климатическими условиями. Это особенно важно для тех нефтедобывающих регионов, в которых отсутствуют данные о фактических объёмах сжигания ПНГ.

## Литература

1. *Верёвкин А. П., Селезнев С. Б.* Утилизация попутного нефтяного газа на основе электрогенерации: проблемы и решения // Нефтегазовое дело. 2015. № 13(1). С. 56–62.
2. *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. № 1. С. 68–72.
3. *Кочергин Г. А., Куприянов М. А., Полищук Ю. М.* Использование космических снимков Landsat-8 для оперативной оценки суммарного объёма факельного сжигания попутного газа на нефтедобывающей территории // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 5. С. 47–55. DOI: 10/21046/2070-7401-2017-14-5-47-55.
4. *Кочергин Г. А., Куприянов М. А., Полищук Ю. М.* Прогнозирование суммарных объёмов факельного сжигания попутного газа на нефтедобывающей территории // Экспозиция Нефть Газ. 2019. № 2. С. 99–102. DOI: 10.24411/2076-6785-2019-10021.
5. *Куприянов М. А.* Автоматизированная система выделения термических точек на основе космических снимков Landsat-8. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2015612965. Рег. 27.02.2015.
6. *Chowdhury S., Shipman T., Chao D., Elvidge C. D., Zhizhin M., Hsu F.* Daytime gas flare detection using Landsat-8 multispectral data // Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS). 2014. P. 258–261. DOI: 10.1109/IGARSS.2014.6946406.
7. *Elvidge C. D., Zhizhin M., Hsu F. C., Baugh K., Khomarudin M. R., Vetritya Y., Sofan P., Suwarsono, Hilman D.* Long-wave infrared identification of smoldering peat fires in Indonesia with nighttime Landsat data // Environment Research Letters. 2015. V. 10(6). P. 65002–65013. DOI: 10.1088/1748-9326/10/6/065002.
8. *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. V. 9. Art. No. 14. 16 p. DOI: 10.3390/en9010014.
9. *Kato S., Kouyama T., Nakamura R., Matsunaga T., Fukuhara T.* Simultaneous retrieval of temperature and area according to sub-pixel hotspots from nighttime Landsat-8 OLI data // Remote Sensing of Environment. 2018. V. 204. P. 276–286. DOI: 10.1016/j.rse.2017.10.025.
10. *Kumar S. S., Roy D. P.* Global Operational Land Imager (GOLI) Landsat-8 reflectance based active fire detection algorithm // Intern. J. Digital Earth. 2018. V. 11. P. 154–178. DOI: 10.1080/17538947.2017.1391341.
11. *López García M. J., Caselles V.* Mapping burns and natural reforestation using thematic Mapper data // Geocarto Intern. 1991. VI. 6(1). P. 31–37. DOI: 10.1080/10106049109354290.
12. *Schroeder W., Oliva P., Giglio L., Quayle B., Lorenz E., Morelli F.* Active fire detection using Landsat-8/OLI data // Remote Sensing of Environment. 2016. V. 185. P. 210–220. DOI: 10.1016/j.rse.2015.08.032.

## Estimation of the volumes of associated gas flaring in oil production area using Landsat-8 satellite images

G. A. Kochergin<sup>1</sup>, M. A. Kupriyanov<sup>1</sup>, Yu. M. Polishchuk<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Ugra Research Institute of Information Technologies, Khanty-Mansiysk 628011, Russia  
E-mail: gak@uriit.ru

<sup>2</sup> Institute of Petroleum Chemistry SB RAS, Tomsk 634021, Russia  
E-mail: yupolishchuk@gmail.com

The methodological issues of estimating the volume of associated petroleum gas flaring in oil fields using medium resolution satellite images are considered. The importance of such estimation is related not only with the possibility of organizing operational monitoring of flared gas volumes in oil-producing areas but also with the need to assess the contribution to the global greenhouse effect of carbon dioxide emissions into atmosphere during associated gas flaring. The previously developed method based on the use of the normalized heat point index proposed by the authors was used for determining the number of flare units in the territory using Landsat-8 satellite images. Using the official data on the total associated gas flaring volumes in the Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug and on the number of flare units in this area, determined from satellite images, an equation has been proposed that allows calculating the expected volumes of gas flaring depending on the number of flare units operating in the territory. An analysis of the developed model error for estimating the total quarterly volumes of gas flaring based on the data on the number of flare units in the oil production area is carried out. It is shown that this error does not exceed 10 % on average. The model can be used in space monitoring of gas flaring volumes using Landsat-8 satellite images.

**Keywords:** flare installations, space images. satellite monitoring, associated petroleum gas, gas burning in oil fields, normalized index of heat points, greenhouse effect

Accepted: 05.10.2020

DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-5-53-60

### References

1. Verevkin A. P., Seleznev S. B., Utilizatsiya poputnogo neftyanogo gaza na osnove elektrogeneratsii: problemy i resheniya (Associated petroleum gas utilization based on power generation: problems and solutions), *Neftegazovoe delo*, 2015, No. 13(1), pp. 56–62.
2. Gribov K. G., Zakharov V. I., Alsynbaev K. S., Sulyaev Ya. S., Metod opredeleniya raskhoda poputnogo gaza na fakelakh po dannym sputnikovogo zondirovaniya sensorami tipa MODIS v IK-kanalakh (A method for determining the rate of associated gas on flares using satellite sensing data by MODIS-type sensors in infrared channels), *Optika atmosfery i okeana*, 2007, Vol. 20, No. 1, pp. 68–72.
3. Kochergin G. A., Kupriyanov M. A., Polishchuk Yu. M., Ispol'zovanie kosmicheskikh snimkov Landsat-8 dlya operativnoi otsenki summarnogo ob'ema fakel'nogo szhiganiya poputnogo gaza na neftedobyvayushchei territorii (The use of Landsat-8 satellite images for the rapid assessment of the total flare of associated gas in oil producing territories), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 5, pp. 47–55, DOI: 10/21046/2070-7401-2017-14-5-47-55.
4. Kochergin G. A., Kupriyanov M. A., Polishchuk Yu. M., Prognozirovaniye summarnykh ob'emov fakel'nogo szhiganiya poputnogo gaza na neftedobyvayushchei territorii (Prediction of total flare volumes of associated gas in oil producing territories), *Ekspozitsiya Neft' Gaz*, 2019, No. 2, pp. 99–102, DOI: 10.24411/2076-6785-2019-10021.
5. Kupriyanov M. A., *Avtomatizirovannaya sistema vydeleniya termicheskikh toчек na osnove kosmicheskikh snimkov Landsat-8* (Automated system for the selection of thermal points based on satellite images Landsat-8), Certificate of state registration of software No. 2015612965 (RU), Reg. 27.02.2015.
6. Chowdhury S., Shipman T., Chao D., Elvidge C. D., Zhizhin M., Hsu F., Daytime gas flare detection using Landsat-8 multispectral data, *Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS)*, 2014, pp. 258–261, DOI: 10.1109/IGARSS.2014.6946406.
7. Elvidge C. D., Zhizhin M., Hsu F. C., Baugh K., Khomarudin M. R., Vetritya Y., Sofan P., Suwarsono, Hilman D., Long-wave infrared identification of smoldering peat fires in Indonesia with nighttime Landsat data, *Environment Research Letters*, 2015, Vol. 10(6), pp. 65002–65013, DOI: 10.1088/1748-9326/10/6/065002.

8. 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, Art. No. 14, 16 p., DOI: 10.3390/en9010014.
9. Kato S., Kouyama T., Nakamura R., Matsunaga T., Fukuhara T., Simultaneous retrieval of temperature and area according to sub-pixel hotspots from nighttime Landsat-8 OLI data, *Remote Sensing of Environment*, 2018, Vol. 204, pp. 276–286, DOI: 10.1016/j.rse.2017.10.025.
10. Kumar S. S., Roy D. P., Global Operational Land Imager (GOLI) Landsat-8 reflectance based active fire detection algorithm, *Intern. J. Digital Earth*, 2018, Vol. 11, pp. 154–178, DOI: 10.1080/17538947.2017.1391341.
11. López García M. J., Caselles V., Mapping burns and natural reforestation using thematic Mapper data, *Geocarto Intern.*, 1991, Vol. 6(1), pp. 31–37, DOI: 10.1080/10106049109354290.
12. Schroeder W., Oliva P., Giglio L., Quayle B., Lorenz E., Morelli F., Active fire detection using Landsat-8/OLI data, *Remote Sensing of Environment*, 2016, Vol. 185, pp. 210–220, DOI: 10.1016/j.rse.2015.08.032.