

Использование космических снимков Landsat 8 для оперативной оценки суммарного объема факельного сжигания попутного газа на нефтедобывающей территории

Г.А. Кочергин¹, М.А. Куприянов¹, Ю.М. Полищук^{1,2}

¹ Югорский НИИ информационных технологий, Ханты-Мансийск, 628011, Россия

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

Работа посвящена изложению методических вопросов оперативной оценки объемов факельного сжигания попутного нефтяного газа на нефтяных месторождениях по спутниковым снимкам среднего разрешения. Важность такой оценки связана не только с возможностью организации оперативного мониторинга объемов сжигаемого газа на нефтедобывающих территориях, но и с необходимостью оценки вклада в глобальный парниковый эффект выбросов двуокси углерода и других парниковых газов в атмосферу при факельном сжигании попутного газа. Рассмотрены методические вопросы дистанционного определения количества действующих на территории нефтедобычи факельных установок по космическим снимкам среднего разрешения. Разработанная методика определения числа факельных установок на территории по космическим снимкам Landsat 8 основана на модификации известного модифицированного индекса гарей. Построена регрессионная модель, позволяющая рассчитывать объем сжигания газа в зависимости от числа работающих факельных установок на территории, с использованием официальных данных о суммарных объемах сожженного попутного газа на территории Ханты-Мансийского автономного округа и о количестве факельных установок на этой территории, определенном по космическим снимкам. Проведен анализ погрешности разработанной модели оценки объемов сжигания газа по данным о числе факельных установок на территории нефтедобычи. Модель может быть использована в задачах спутникового мониторинга объемов сжигаемого газа с использованием космических снимков Landsat 8.

Ключевые слова: факельные установки, Landsat 8, попутный нефтяной газ, сжигание газа на месторождениях, парниковый эффект, нефтегазодобывающие территории

Одобрена к печати: 19.07.2017
DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-5-47-55

Введение

Одной из важных экологических проблем нефтедобывающих регионов стало сжигание попутного нефтяного газа (ПНГ) на нефтяных месторождениях, в результате которого в атмосферу выбрасываются значительные объемы экологически опасных продуктов сгорания, например оксиды азота и сажа, оказывающие вредные воздействия на лесорастительный покров нефтедобывающих территорий (Полищук, Токарева, 2014; Токарева, Полищук, 2013). В результате сжигания попутного газа в атмосферу выбрасываются большие объемы углекислого газа, что дает значительный вклад в парниковый эффект как один из факторов глобального потепления. По оценкам экспертов, при сжигании 400 м³ газа выделяется около одной тонны CO₂. В связи с этим представляет значительный интерес организация спутникового мониторинга территориальных объемов ПНГ, сжигаемого в факельных установках на месторождениях на территории нефтедобывающих регионов. Особенно острой стала эта проблема для Ханты-Мансийского автономного округа (ХМАО), где в настоящее время добывается половина объема российской нефти. Перспективным для решения этой проблемы рассматривается применение данных дистанционного зондирования (ДДЗ), получаемых с космических аппаратов.

В статьях (Алсынбаев и др., 2013; Грибанов и др., 2007; Elvidge et al., 2016) рассматриваются вопросы оценки объема сжигаемого газа на отдельных факельных установках (ФУ) с использованием информации о яркости ФУ, полученной по космическим снимкам. Однако методы, изложенные в цитированных работах (Алсынбаев и др., 2013; Грибанов и др., 2007; Elvidge et al., 2016), ориентированы на использование снимков низкого пространственного разрешения, не позволяющих выявлять отдельные ФУ на нефтедобывающих территориях. Более приемлемым, по нашему мнению, является подход к оценке территориального объема сжигаемого газа, основанный на учете установленной в работе (Кочергин, Куприянов, Полищук, 2016) зависимости суммарных объемов сжигания газа на территории от количества действующих на данной территории ФУ, которые могут обнаруживаться по космическим снимкам среднего разрешения. Однако методические вопросы такого подхода в настоящее время разработаны недостаточно, а вопросы дешифрирования факельных установок и определения их количества по космическим снимкам среднего разрешения ни в цитированной работе (Кочергин, Куприянов, Полищук, 2016), ни в других известных нам публикациях вообще не рассматриваются.

В связи с этим целью данной работы стала разработка методических вопросов дешифрирования факельных установок и определения их количества по космическим снимкам среднего разрешения и использования этих данных для оперативной оценки суммарных объемов сожженного газа в задачах мониторинга сжигания ПНГ на территории нефтедобывающего региона на примере ХМАО.

Данные и территория исследования

В качестве данных о фактических объемах сжигаемого ПНГ были использованы материалы отчетов Департамента недропользования и природных ресурсов Ханты-Мансийского автономного округа — Югры, размещаемые на официальном сайте (Итоги деятельности отрасли, 2016), которые содержат ежеквартальные статистические данные о суммарных объемах сжигаемого ПНГ на всей территории автономного округа.

Для определения числа ФУ на территории ХМАО использовались космические снимки среднего пространственного разрешения со спутника Landsat 8. Данный спутник, введенный в эксплуатацию в 2013 г., оснащен двумя сенсорами, первый из них проводит съемку в девяти спектральных каналах видимого, ближнего и коротковолнового инфракрасного диапазонов (OLI), второй — в двух тепловых инфракрасных каналах (TIRS). В данной работе использовались растровые изображения 4-го (с длиной волны 636–673 нм), 5-го (851–879 нм), 7-го (2107–2294 нм) и 11-го (11 500–12 510 нм) 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 съемки — 16 сут, однако за счет взаимного перекрытия соседних витков можно получить данные с меньшей периодичностью.

Определение количества факельных установок

Разработанная нами 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.

Ниже дано более подробное описание этих процедур.

Предварительная обработка космических снимков

Для проведения предварительной обработки космических снимков Landsat 8 использовался алгоритм (Using the USGS Landsat 8 Product, 2016), опубликованный на официальном сайте Геологической службы США, являющейся поставщиком космических снимков со спутника Landsat 8. Указанный алгоритм реализован нами в виде программы на языке программирования Python, использующий библиотеки Python 2.7.5 и инструменты программного обеспечения ArcGIS. С помощью этой программы исходные значения пикселей изображения 4-го, 5-го и 7-го спектральных каналов пересчитываются в значения спектрального коэффициента отражения с поправкой на угол падения солнечных лучей, а значения пикселей 11-го канала — в яркостную температуру.

Выявление термических точек

В основе алгоритмической процедуры выявления термических точек лежит идея преобразования четырех предварительно обработанных растровых изображений в векторное изображение, представляющее собой группирование пикселей с более высокой яркостью, которые могут быть интерпретированы как термические точки. Эта процедура выполняется в виде последовательности семи этапов, рассматриваемых ниже.

Этап 1. Преобразование трех растровых изображений 4-го, 5-го и 7-го каналов в единое растровое покрытие на основе предлагаемого нами модифицированного индекса гарей NBR_{mod} , величина которого рассчитывается по формуле:

$$NBR_{mod} = \frac{1}{2} \left(\frac{B4 - B7}{B4 + B7} + \frac{B5 - B7}{B5 + B7} \right), \quad (1)$$

где каждое из слагаемых представляет собой величину нормализованного индекса гарей (NBR, Normalized Burn Ratio), введенного в статье (López García, Caselles, 1991); $B4$, $B5$ и $B7$ — значения пикселей предварительно обработанных изображений в 4-м, 5-м и 7-м спектральных каналах соответственно.

Значения каждого из слагаемых в формуле (1) изменяются в диапазоне от -1 до $+1$. Поэтому и значения индекса NBR_{mod} , а следовательно, и значения пикселей полученного растрового покрытия, будут определяться в том же интервале: от -1 до $+1$.

Этап 2. Преобразование полученного на предыдущем этапе покрытия к бинарному виду с использованием бинарной классификации.

Этап 3. Сглаживание предварительно обработанного изображения 11-го канала методом «скользящего окна» с выбором размера «окна» 21×21 пикселей.

Этап 4. Получение разностного изображения 11-го канала вычислением разности значений пикселей предварительно обработанного изображения 11-го канала и пикселей его сглаженного представления, полученного на предыдущем этапе.

Этап 5. Преобразование полученного разностного изображения 11-го канала к бинарному виду с использованием бинарной классификации.

Этап 6. Получение интегрированного изображения бинарного вида перемножением значений пикселей изображений, полученных на этапах 2 и 5.

Этап 7. Векторизация полученного на предыдущем этапе интегрированного изображения.

Результирующее векторное изображение интерпретируется как поле термических точек. Описанная процедура выявления термических точек была реализована в виде программного комплекса «Автоматизированная система выделения термических точек на основе космических снимков Landsat 8» (автор — М.А. Куприянов), зарегистрированного в Роспатенте (Свидетельство 2015612965, 2015).

Идентификация ФУ. Отнесение контура термической точки к факельной установке проводилось путем совмещения со снимками высокого пространственного разрешения («Канопус-В», «Ресурс-П», GeoEye и др.) и выявления на них явных признаков факельной установки (обваловка, пламя и др.).

Построение модели дистанционной оценки объемов сожженного газа

Рассмотрим методические вопросы разработки модели оценки объемов сжигаемого газа, основанной на учете обнаруженной в работе (Кочергин, Куприянов, Полищук, 2016) эмпирической взаимосвязи объемов сжигаемого газа с числом выявленных на территории ФУ. Данные об объемах сжигаемого газа, заимствованные на сайте (Итоги деятельности отрасли, 2016), и количество ФУ, определенное по снимкам Landsat 8 в соответствии с методикой, описанной в предыдущем разделе, представлены поквартально в *табл. 1*.

Графики временного хода объемов сжигаемого газа и количества ФУ, совмещенные с графиком динамики объемов добываемой нефти, приведены на *рис. 1*, на котором видно, что все три рассматриваемые показателя проявляют заметный годовой ход. Так, относительные максимумы в графиках годовых ходов приходятся на теплые периоды каждого года (II и III кварталы), а относительные минимумы — на холодные (IV и I кварталы). Следовательно,

согласованная периодичность в изменении численности ФУ и объема сжигаемого газа, по-видимому, обусловлена цикличностью объема добычи нефти. Согласованное же во времени сокращение в среднем объема сжигания газа и количества ФУ может быть объяснено проведением в последние годы на территории ХМАО мероприятий по увеличению объемов утилизации ПНГ, что проявляется сокращением количества ФУ и объемов сжигаемого газа.

Таблица 1. Данные об объемах сжигаемого газа и количестве действующих ФУ на территории ХМАО

Год	Квартал	Объем сжигания ПНГ, млн м ³	Количество ФУ, шт.	Количество снимков, шт.
2013	III	823	323	130
	IV	566	163	52
2014	I	520	205	87
	II	620	289	105
	III	710	247	121
	IV	440	177	92
2015	I	487	173	95
	II	575	271	134
	III	596	202	101
	IV	371	164	78
2016	I	360	186	116
	II	479	265	145
	III	422	243	125
	IV	294	220	95

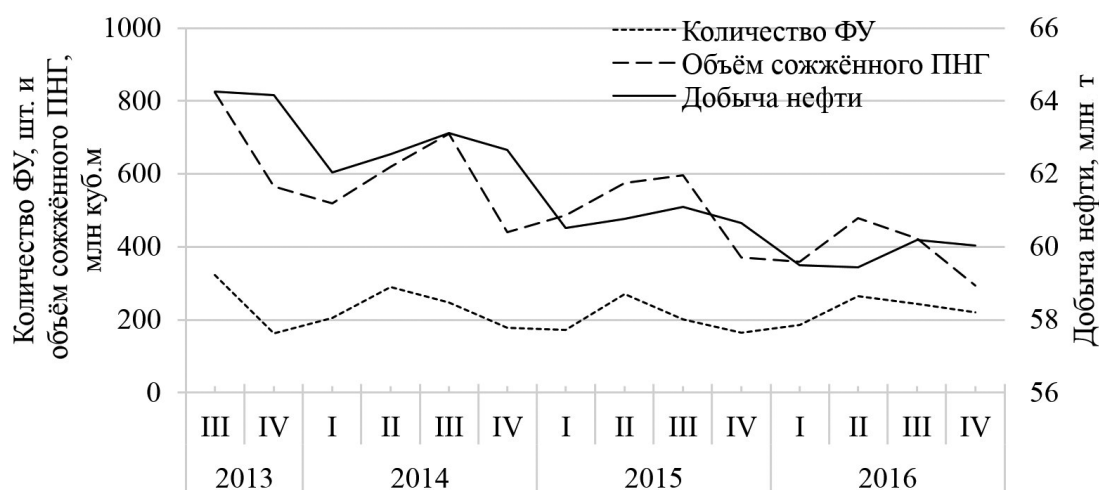


Рис. 1. Графики временного хода количества ФУ, объемов сожженного ПНГ и добычи нефти

Графики на рис. 1 позволяют на качественном уровне сделать вывод о том, что изменение объема сжигания газа проявляет зависимость от изменения количества ФУ. В связи с этим представляет интерес проведение исследования взаимосвязи между объемом сжигаемого газа и количеством действующих ФУ, которое выполняется в нашей работе методом линейного регрессионного анализа. Для проведения этих исследований в качестве

обучающей выборки использовались данные из *табл. 1* об объемах сожженного газа и количестве факелов за период с III квартала 2013 г. по II квартал 2015 г. включительно. На *рис. 2* представлен график зависимости объемов сожженного ПНГ от числа ФУ. Точками на графике отображаются значения величины объема газа, сожженного в соответствующем квартале, и число выявленных ФУ в том же квартале.

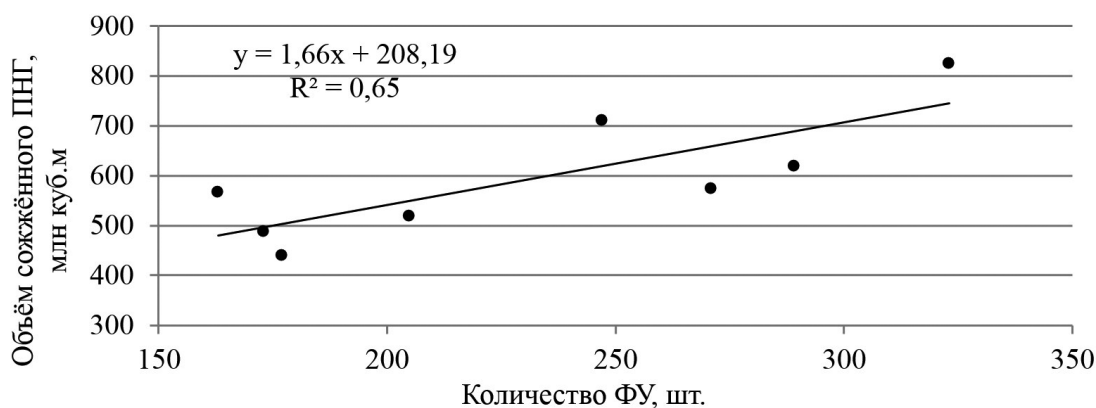


Рис. 2. Зависимость объемов сожженного ПНГ от количества ФУ

В результате проведенного регрессионного анализа с использованием программы MS Excel найдено (с достаточно высоким уровнем коэффициента детерминации $R^2 = 0,65$) уравнение линейной регрессии, связывающее объем сожженного за квартал ПНГ y с количеством факельных установок x в виде:

$$y = 1,66x + 208,19. \quad (2)$$

На *рис. 2* прямая линия отображает линейную зависимость объемов сожженного ПНГ от количества действующих ФУ в виде соотношения (2). Полученная регрессионная модель может использоваться для оценки суммарных объемов сжигаемого ПНГ на территории нефтедобычи на основе данных о количестве действующих ФУ.

Для проверки адекватности разработанной модели в качестве контрольной выборки были использованы фактические данные из *табл. 2* за период с III квартала 2015 г. по IV квартал 2016 г. Результаты расчета объемов сжигания газа по формуле (2) для этого же периода представлены в *табл. 2*.

Таблица 2. Данные о фактических и расчетных объемах сжигаемого газа

Год	Квартал	Фактический объем сожженного ПНГ, млн м ³	Расчетный объем сожженного ПНГ, млн м ³
2015	III	596	544,4
	IV	371	481,2
2016	I	360	517,8
	II	479	649,3
	III	422	612,7
	IV	294	574,4

Относительная погрешность оценки объема сожженного газа определяется на основе данных из *табл. 2* по формуле:

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

где V_{pi} и $V_{\phi i}$ — расчетный и фактический объем сожженного газа соответственно; m — объем контрольной выборки, $m = 6$.

Расчет показал, что величина δ составила 40,2%. Такую погрешность в условиях практически полного отсутствия данных об общих объемах сжигания ПНГ в большинстве российских нефтедобывающих регионов можно считать приемлемой.

Заключение

Разработана методика выявления местоположения факельных установок и определения их количества с использованием спутниковых снимков среднего разрешения Landsat 8. Проведен совместный анализ фактических данных об объемах сжигаемого ПНГ на территории ХМАО и данных о количестве факельных установок, определенных по космическим снимкам. В результате проведенного анализа построена регрессионная модель оценки объемов сжигаемого ПНГ. Рассчитанная погрешность оценки объема ПНГ на территории ХМАО с использованием модели составила 40,2%. Разработанная модель может быть использована для оперативной оценки суммарных объемов сжигания попутного газа на месторождениях в нефтедобывающих регионах с использованием космических снимков.

Литература

1. *Алсынбаев К.С., Брыксин В.М., Евтюшкин А.В., Ерохин Г.Н., Козлов А.В.* Оценка мощности факельных установок по сжиганию попутного нефтяного газа на основе обработки космоснимков MODIS // Вестник БФУ им. И. Канта. 2013. № 10. С. 131–137.
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. Итоги деятельности отрасли [Электронный ресурс]: официальные отчеты / Департамент недропользования и природных ресурсов Ханты-Мансийского автономного округа — Югры. URL: <https://depprirod.admhmao.ru/deyatelnost/arkhiv-deyatelnost-departamenta-do-2017-goda/757106/2016-god> (дата обращения: 13.10.2017).
4. *Кочергин Г.А., Куприянов М.А., Полищук Ю.М.* Оценка суммарного объема факельного сжигания попутного газа на нефтедобывающей территории по снимкам Landsat 8 // Экспозиция Нефть Газ. 2016. № 11. С. 16–18.
5. *Полищук Ю.М., Токарева О.С.* Использование космических снимков для экологической оценки воздействия факельного сжигания попутного газа на нефтяных месторождениях Сибири // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27. № 7. С. 647–651.
6. Свидетельство 2015612965 Российская Федерация. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. Автоматизированная система выделения термических точек на основе космических снимков Landsat 8 / М.А. Куприянов; заявитель и правообладатель АУ «Югорский НИИ информационных технологий»; заявл. 30.12.2014; зарег. 27.02.2015.
7. *Токарева О.С., Полищук Ю.М.* Сравнительный анализ результатов дистанционного определения вегетационных индексов и данных биоиндикационных исследований в задачах экологического мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 2. С. 81–87.

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 (1). P. 14. DOI: 10.3390/en9010014.
9. López García M.J., Caselles V. Mapping burns and natural reforestation using thematic Mapper data // *Geocarto International*. 1991. Vol. 6. Issue 1. P. 31–37. DOI: 10.1080/10106049109354290.
10. Using the USGS Landsat 8 Product: Landsat 8 user guide. United States Geological Survey. URL: http://landsat.usgs.gov/Landsat8_Using_Product.php (дата обращения: 17.04.2017).

The use of Landsat 8 space images for rapid assessment of total flaring volumes of associated gas in the oil-producing territory

G.A. Kochergin¹, M.A. Kupriyanov¹, Yu.M. Polishchuk^{1,2}

¹Ugra Research Institute of Information Technologies, Khanty-Mansiysk 628011, Russia

²Institute of Petroleum Chemistry SB RAS, Tomsk 634021, Russia

E-mail: yupolishchuk@gmail.com

The work is devoted to the presentation of methodological issues of the operational estimation of flaring volumes of associated petroleum gas in oil fields based on satellite images of medium resolution. The importance of estimating the amount of associated gas flaring is associated not only with the possibility of organizing the monitoring of the volumes of combusted gas in oil producing areas, but also with the need to assess the contribution to the global greenhouse effect of carbon dioxide and other greenhouse gases emitted into the atmosphere by associated gas flaring. Methodical issues of remote determination of the number of gas flares active in the oil production area from medium resolution satellite images are considered. The developed method for determining the number of flare units in the territory from the Landsat 8 satellite images is based on the modification of the known normalized burnt index. Using the official data on the total amount of burned associated gas in the Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug and the number of gas flares in this area, determined from the satellite images, a regression model has been constructed that allows calculating the volume of gas combustion depending on the number of operating flares in the territory. The error of the developed model for estimating the volumes of gas combustion from the data on the number of flare units in the oil production area is analyzed. The model can be used in the tasks of satellite monitoring of volumes of combusted gas using Landsat satellite imagery.

Keywords: gas flare, Landsat 8, associated petroleum gas, gas combustion in fields, greenhouse effect, oil and gas producing areas

Accepted: 19.07.2017

DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-5-47-55

References

1. Alsynbaev K.S., Bryksin V.M., Evtushkin A.V., Erokhin G.N., Kozlov A.V., Otsenka moshchnosti fakel'nykh ustanovok po szhiganiyu poputnogo neftyanogo gaza na osnove obrabotki kosmosnimkov MODIS (Estimation of the capacity of flare plants for the combustion of associated petroleum gas based on MODIS satellite imagery), *Vestnik BFU im. I. Kanta*, 2013, No. 10, pp. 131–137.
2. Griбанov 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 (Method for determination of the associated gas consumption by flares from satellite sensing data by MODIS-type sensors in IR channels), *Optika atmosfery i okeana*, 2007, Vol. 20, No. 1, pp. 68–72.
3. <https://depprirod.admhmao.ru/deyatelnost/arkhiv-deyatelnost-departamenta-do-2017-goda/757106/2016-god>.
4. Kochergin G.A., Kupriyanov M.A., Polishchuk Yu.M., Otsenka summarnogo ob'ema fakel'nogo szhiganiya poputnogo gaza na nefte dobyvayushchei territorii po snimkam Landsat 8 (Estimation of the total volume of flaring of associated gas in the oil-producing territory from Landsat 8 images), *Ekspozitsiya Neft' Gaz*, 2016, No. 11, pp. 16–18.
5. Polishchuk Yu.M., Tokareva O.S., Ispol'zovanie kosmicheskikh snimkov dlya ekologicheskoi otsenki vozdeistviya fakel'nogo szhiganiya poputnogo gaza na neftnykh mestorozhdeniyakh Sibiri (The use of space images for the environmental assessment of the impact of flaring of associated gas in the oil fields of Siberia), *Optika atmosfery i okeana*, 2014, Vol. 27, No. 7, pp. 647–651.
6. *Software Patent No. 2015612965 Russian Federation*, File 30.12.2014, Reg. 27.02.2015, Publ. 20.03.2015.

7. Tokareva O.S., Polishchuk Yu.M., Sravnitel'nyi analiz rezul'tatov distantsionnogo opredeleniya vegetatsionnykh indeksov i dannykh bioindikatsionnykh issledovaniy v zadachakh ekologicheskogo monitoring (Comparative analysis of the results of remote determination of vegetative indices and data of bioindication research in the tasks of ecological monitoring), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2013, Vol. 10, No. 2. pp. 81–87.
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 (1), p. 14. DOI: 10.3390/en9010014.
9. López García M.J., Caselles V., Mapping burns and natural reforestation using thematic Mapper data, *Geocarto International*, 1991, Vol. 6, Issue 1, pp. 31–37. DOI: 10.1080/10106049109354290.
10. *Using the USGS Landsat 8 Product: Landsat 8 user guide*, United States Geological Survey. URL: http://landsat.usgs.gov/Landsat8_Using_Product.php.