

УДК 504.064

Оценка атмосферного загрязнения при сжигании попутного газа по данным дистанционных наблюдений теплового излучения

М.Н. Алексеева¹, В.Ф. Рапута², Т.В. Ярославцева³, И.Г. Яценко^{1*}

¹Институт химии нефти СО РАН

634055, г. Томск, пр. Академический, 3

²Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН

630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6

³Новосибирский научно-исследовательский институт гигиены

630108, г. Новосибирск, ул. Пархоменко, 7

Поступила в редакцию 28.02.2019 г.

С использованием космических снимков Landsat-8, сделанных в зимний период, выявлены действующие факельные установки сжигания попутного нефтяного газа на западе Томской обл. Определены зоны их теплового воздействия на ландшафт нефтяных месторождений. Предложена модель оценивания регионального загрязнения территорий от совокупности источников. На основе этой модели и данных теплового излучения факелов численно восстановлены поля относительного загрязнения окружающих территорий нефтедобычи в зимний и летний периоды года.

Ключевые слова: тепловые космические снимки, нефтяные месторождения, сжигание попутного нефтяного газа, загрязнение атмосферы, модель оценивания; thermal satellite imagery, oil fields, associated gas flaring, air pollution, model of estimation.

Введение

Следствием интенсивного развития нефтегазодобывающего комплекса является усиление техногенного влияния на окружающие территории. При сжигании попутного нефтяного газа (ПНГ) на факельных установках (ФУ) в атмосферный воздух поступает большое количество вредных веществ: сажа, оксид углерода, оксиды азота, диоксид серы, сероводород, бутан, гексан, пентан, метан, этан, бензапирен и др. Миграция высокотемпературной газовой смеси на значительные расстояния приводит к загрязнению атмосферного воздуха, усилению парникового эффекта нижних слоев атмосферы [1], тепловому загрязнению атмосферы и почвы [2, 3]. Важная задача контроля качества воздуха — определение полей приземных концентраций загрязняющих веществ, поступающих от ФУ.

Эту задачу следует решать с помощью междисциплинарного подхода, позволяющего выполнить комплексный анализ, дать оценку и прогноз изменений состояния атмосферного воздуха при аэрозольном и тепловом загрязнении. Сведений об источниках и объемах сжигания ПНГ недостаточно для численного моделирования и изучения процессов загрязнения атмосферы от действующих ФУ, поэтому целесообразно использовать спутниковую информацию [4–10].

Проблема численного моделирования распространения примесей в атмосфере от большого количества источников относится к числу наиболее сложных. При ее решении необходимо учитывать уровень обеспеченности математических моделей входной информацией. В связи с этим требуется предварительный многоэтапный анализ экспериментальных данных и применение на его основе соответствующих методик определения зон распространения примесей в атмосфере. В частности, при моделировании длительного загрязнения местности стационарными источниками вместо текущей метеорологической информации можно использовать климатическую — информацию об усредненном физическом состоянии атмосферы за многолетний период (температура, количество осадков, скорость и направление ветра и т.д.) [11]. Существуют также методики математического описания процессов переноса газовых загрязняющих примесей на большие расстояния от точечных и распределенных источников [12–14].

Целью настоящей статьи является оценка ареалов загрязнения на региональном уровне с помощью существующих методик детектирования теплового излучения ФУ по космическим снимкам нефтегазодобывающих территорий Томской обл.

1. Методы исследования

Для выявления действующих ФУ и определения теплового излучения при сжигании ПНГ на территории 12 месторождений Томской обл. использовались кос-

* Мария Николаевна Алексеева (amn@ipc.tsc.ru); Владимир Федотович Рапута (raputa@sscc.ru); Татьяна Владимировна Ярославцева (tani-ta@list.ru); Ирина Германовна Яценко (sric@ipc.tsc.ru).

мические снимки Landsat-8, сделанные в зимний период 2017 г. Для идентификации месторождений были задействованы картографические материалы геоинформационной системы, а также информация об объемах добычи нефти и концентрациях попутного нефтяного газа в ней на исследуемых месторождениях (данные Института химии нефти СО РАН) [15, 16]. Выявление и картирование ФУ по сжиганию ПНГ с использованием геоинформационных программ ERDAS Imagine и ArcMap включают следующие этапы [7]:

1. Пересчет исходных значений пикселей изображения 11-го теплового спектрального канала из единиц абсолютного излучения в значения спектрального излучения, далее – преобразование значений спектрального излучения в значения яркостной температуры. Эти вычисления автоматизированы и проводятся с использованием стандартных формул обработки информации в рамках основных научных задач Landsat-8.

2. Создание в ArcMap цифровых слоев наиболее высокотемпературных пикселей с центром расположения ФУ из растров яркостной температуры, полученных на предыдущем этапе, и зон их теплового воздействия. Рассчитываются площади зон теплового воздействия на ландшафты от действующих ФУ.

Для создания цифровых слоев проводились процедуры:

1. Расчет средней яркостной температуры всех пикселей \bar{X} без термовоздействия в границах одного месторождения по формуле

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i. \quad (1)$$

Здесь n – количество пикселей; X_i – значение яркостной температуры i -го пикселя без термовоздействия в границах одного месторождения. Среднее значение яркостных температур по всем рассматриваемым месторождениям ($\Sigma \bar{X} / 12$) в марте составило $-2,7^\circ \text{C}$.

2. Выбор в среде ArcMap пикселей зоны теплового воздействия ($X_{\text{зоны}}$) со значениями яркостных температур выше фоновой температуры месторождения по формуле

$$X_{\text{зоны}} > 2,7 + \bar{X}, \quad (2)$$

где $2,7$ – обратное среднее значение яркостной температуры пикселей территорий всех рассматриваемых месторождений без термовоздействий.

3. Выбор пикселя с наибольшей яркостной температурой ($Y_{\text{ТФУ}}$) в ареале воздействия факела по формуле

$$Y_{\text{ТФУ}} = \max(X_{\text{зоны}}).$$

2. Модель оценки длительного регионального атмосферного загрязнения

На расстоянии 7–10 км от источника выбросов моделирование поля концентрации примеси в погра-

ничном слое атмосферы значительно упрощается, так как достигается практически равномерное перемешивание примеси по вертикали [12, 14]. В этом случае наиболее значимыми параметрами являются средняя скорость ветра, высота слоя перемешивания, скорость выхода газовой смеси из устья ФУ, высота и диаметр трубы ФУ и величина поперечного расширения факела примеси [12, 17].

При рассмотрении процессов длительного атмосферного загрязнения территорий допускается дальнейшее упрощение количественного описания полей концентраций примесей. Так, для случая точечного источника в условиях стационарного и горизонтально однородного пограничного слоя атмосферы концентрацию слабооседающей примеси можно представить в виде [12, 14]:

$$C(r, \varphi) = \frac{\theta \cdot P(\varphi + 180^\circ)}{r} \quad (3)$$

(r, φ – полярные координаты; $P(\varphi)$ – роза ветров за рассматриваемый промежуток времени). В (3) параметр θ является агрегированной величиной и вычисляется по формуле

$$\theta = \frac{M \cdot F}{2\pi \cdot u \cdot h}, \quad (4)$$

где M – мощность эмиссии источника; h, u – средняя толщина слоя перемешивания и скорость ветра в нем соответственно; F – решение полуэмпирического уравнения турбулентной диффузии для линейного источника [17], стремящееся к единице по мере удаления от источника.

Замечание. Соотношения (3), (4) могут быть использованы и для оценки поля загрязнения $Q(r, \varphi)$ поверхности земли (почвенного, растительного, снежного покровов) [13, 14] в предположении, что

$$Q(r, \varphi) = \mu \cdot C(r, \varphi),$$

где μ – коэффициент взаимодействия примеси с подстилающей поверхностью.

Для описания региональных полей концентрации примеси от совокупности факелов воспользуемся принципом суперпозиции. Тогда суммарное поле концентрации $C(x, y, \theta)$ для рассматриваемой примеси описывается соотношением

$$C(x, y, \theta) = \sum_{k=1}^K \theta_k C_k(x, y). \quad (5)$$

Здесь $\theta = (\theta_1, \dots, \theta_K)$, $\theta_k = \frac{M_k \cdot F}{2\pi \cdot u \cdot h}$; M_k – величина эмиссии k -го факела; $C_k(x, y)$ – нормированное поле концентрации от k -го факела единичной мощности, рассчитываемое на основе (3).

В общем случае вектор параметров θ может быть неизвестен. Тогда его следует оценивать на основе решения обратной задачи исходя из условия минимума квадратичного функционала [18]:

$$J(\theta) = \sum_{n=1}^N \sigma_n^2 [b_n - C(x_n, y_n, \theta)]^2, \quad (6)$$

где b_n – измеренное значение концентрации в точке (x_n, y_n) ; σ_n^2 – дисперсия ошибки измерения; N – число точек измерений.

3. Результаты и обсуждение

Применение алгоритма обработки растрового изображения 11-го канала космических снимков Landsat-8 и методов цифрового картографирования позволило идентифицировать действующие ФУ 12 месторождений Томской обл. (таблица).

Проанализируем взаимосвязь между показателями таблицы. Корреляция между максимальной яркостной температурой пикселя с центром расположения ФУ и площадью зоны термического воздействия от факела высокая (0,9): наибольшие объемы выбросов наблюдаются от факелов, расположенных в границах зон с самыми высокотемпературными пикселями, следовательно, увеличиваются площади зон их теплового воздействия. Данные таблицы указывают на возможность моделирования концентраций загрязняющих веществ на основе данных о тепловом излучении.

При наличии информации об эмиссии от факелов различных примесей (газовые примеси, полиароматические и нефтяные углеводороды, макрокомпоненты, тяжелые металлы) и о метеорологических параметрах зависимости (3)–(5) позволяют проводить прямое моделирование полей концентраций разового и дли-

тельного атмосферного загрязнения местности. Когда эмиссия источников неизвестна, возможна оценка полей концентраций относительного регионального загрязнения с помощью данных о тепловом излучении. Полагая, что выделение тепла пропорционально мощности эмиссии M_k от k -го факела, $M_k = \alpha T_k$, $k = 1, \dots, K$, с учетом (3)–(5) получаем следующее соотношение для вычисления поля относительной региональной концентрации примеси от совокупности факелов:

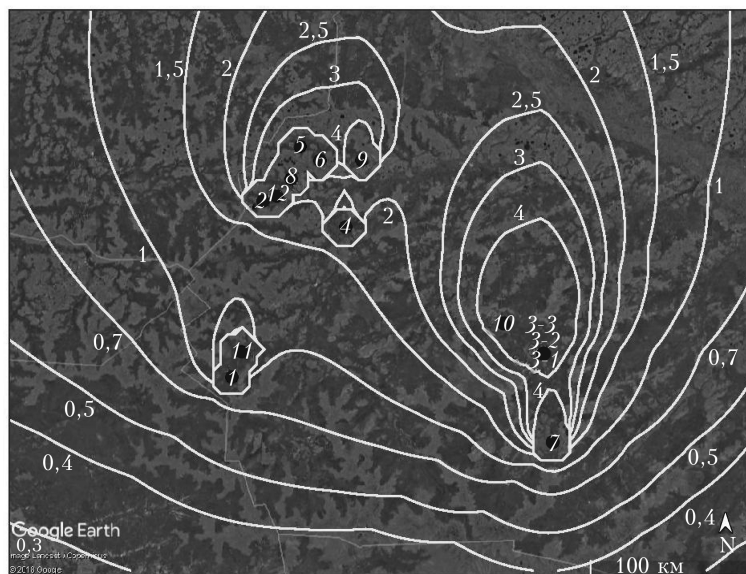
$$P(x, y, \mathbf{S}) = \sum_{k=1}^K S_k P_k(x, y), \quad (7)$$

где $\mathbf{S} = (S_1, \dots, S_K)$, $S_k = \frac{T_k \cdot F}{2\pi \cdot u \cdot h}$, T_k – яркостная температура k -го факела; α – коэффициент пропорциональности; $P_k(x, y)$ – нормированное поле концентрации от k -го факела.

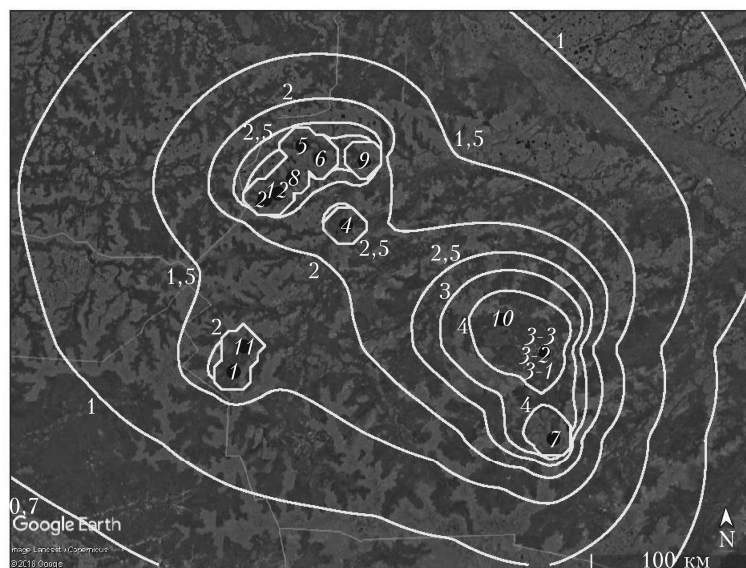
На рисунке приведены результаты оценивания относительного регионального загрязнения атмосферы от выявленных действующих факелов на основе этого подхода и с использованием данных космического зондирования теплового излучения. Следует

Характеристика месторождений Томской обл. и действующих ФУ, идентифицированных по снимкам Landsat-8

Месторождение (дата снимка)	Номер факела	Координаты факелов	Средняя фоновая яркостная температура, °С	Максимальная яркостная температура пикселя (участок с факелом), °С	Площадь зоны термического воздействия, км ²	Добыча нефти, тыс. т	Количество газа в нефти, м ³ /т
Крапивинское (20.03.2017)	1	58°4'15,578" с.ш., 75°37'3" в.д.	-2	6	0,043	2070	31,88
Первомайское (20.03.2017)	2	59°3'8,244" с.ш., 75°56'24,294" в.д.	-6	3	0,048	1026	45,32
Лугинецкое, 3 факела (22.03.2017)	3-1	58°9'24,028" с.ш., 78°54'12,883" в.д.;	-1	57	0,155	796	161,68
	3-2	58°9'33,076" с.ш., 78°52'59,876" в.д.;		8	0,02		
	3-3	58°9'9,065" с.ш., 78°53'4,69" в.д.		15	0,04		
Южно-Черемшанское (22.03.2017)	4	58°53'32,705" с.ш., 76°50'11,648" в.д.	-3	4	0,025	612	30,95
Олень (20.03.2017)	5	59°21'20,253" с.ш., 76°20'28,748" в.д.	-5	1	0,004	455	65,15
Столбовое (22.03.2017)	6	59°16'31,092" с.ш., 76°33'15,611" в.д.	-5	4	0,017	438	35
Герасимовское (22.03.2017)	7	57°40'15,161" с.ш., 78°55'39,024" в.д.	-2	24	0,057	328	92,89
Катыльгинское (20.03.2017)	8	53°10'26,268" с.ш., 76°14'38,492" в.д.	-4	6	0,052	179	52,68
Ломовое (20.03.2017)	9	59°16'6,045" с.ш., 77°2'2,676" в.д.	-3	13	0,035	100	204,03
Шингинское (22.03.2017)	10	58°19'42,891" с.ш., 78°29'18,791" в.д.	-2	12	0,027	93	89
Двуреченское (20.03.2017)	11	58°12'37,115" с.ш., 75°42'54,589" в.д.	-4	2	0,012	47,54	36,2
Западно-Катыльгинское (20.03.2017)	12	59°4'37,794" с.ш., 76°4'55,313" в.д.	-4	7	0,019	30	57



a



б

Относительные: *a* – среднезимняя; *б* – среднелетняя концентрации примеси в атмосфере ($\text{град} \cdot \text{с}/\text{м}^3$), рассчитанные на основе данных о тепловом излучении нефтегазовых факелов; точки – расположение ФУ с указанием номеров, кривые – изолинии изменения концентрации примеси, рассчитанной по формуле (7)

отметить, что локальный ореол рассеивания от одного факела составляет в среднем 2–6 км. В региональных полях рассчитанных концентраций ($\text{град} \cdot \text{с}/\text{м}^3$) наблюдается эффект сложения распространения примесей от факелов, и в этом случае площадь зон распространения примесей увеличивается.

Анализ рисунка показывает наличие нескольких максимумов полей концентраций. Наиболее крупный максимум образован выбросами примесей от ФУ Лугинецкого (факелы 3-1, 3-2, 3-3), Герасимовского (факел 7), Шингинского (факел 10) нефтяных месторождений как в летний, так и в зимний периоды. Другой максимум сформировался за счет выбросов от ФУ Катильгинского (факел 8), Ломового (факел 9), Западно-Катильгинского (факел 12), Южно-Черемшанского (факел 4), Столбового (фа-

кел 6) месторождений. Конфигурации зимних и летних полей концентраций заметно отличаются, что объясняется особенностями зимней и летней розы ветров [19].

Как правило, при сжигании ПНГ на ФУ наибольшая доля выбросов приходится на оксид углерода, в среднем составляя от 65 до 80%. Доля выбросов диоксида азота в среднем равна 1–3%. Объемы выбросов бутана, гексана, пентана, метана, этана варьируются в зависимости от состава ПНГ.

Обозначенные на рисунке изолинии полей относительных концентраций примесей (лето – от 0,7 до 4; зима – от 0,3 до 4) расположены на достаточном удалении от ФУ и отвечают условиям полного перемешивания примеси в пограничном слое атмосферы. Представленные результаты расчетов могут быть

полезны при планировании размещения наземной системы регионального мониторинга аэрозольного загрязнения территорий.

Заключение

Методика использования данных 11-го термоканала снимков среднего разрешения Landsat-8 позволила с высокой точностью обнаружить в границах 12 месторождений западной части Томской обл. функционирующие ФУ. Определены границы и площади зон теплового воздействия на эти месторождения. Результаты исследования были использованы для оценки относительного уровня регионального загрязнения окружающих территорий нефтедобычи.

В дальнейшем полученные результаты могут быть полезны для разработки систем наземного мониторинга и моделей оценивания суммарных выбросов и воздействия факельного сжигания ПНГ на экосистемы и атмосферные процессы. Эти исследования необходимо проводить на основе комплексного использования результатов космического зондирования теплового излучения нефтегазовых факелов и данных наземных наблюдений многокомпонентного загрязнения территорий.

Разработка алгоритма идентификации ФУ на космических снимках, расчет зоны теплового воздействия выполнены в ИХН СО РАН по проекту НИР ПФНИ ГАН на 2013–2020 гг. V.46.1.2. «Диагностика состояния и восстановление природных экосистем на объектах нефтегазового комплекса Западной Сибири и прилегающих территориях» № ГР АААА-А17-117030310200-4. Справочные данные по объемам нефтедобычи и содержанию газа в нефти приведены из базы данных о свойствах нефти ИХН СО РАН.

Моделирование региональных зон загрязнения выполнено в ИВМиМГ СО РАН по Проекту НИР ПФНИ ГАН на 2013–2020 годы 1.4.1.2. «Развитие методов математического моделирования для задач физики атмосферы, гидросферы и охраны окружающей среды».

1. Книжников А.Ю., Ильин А.М. Проблемы и перспективы использования попутного нефтяного газа в России. М.: Всемирный фонд дикой природы, 2017. 32 с.
2. Евдокимов И.В., Юсупов И.А., Ларионова А.А., Быховец С.С., Глаголев М.В., Шавнин С.А. Тепловое воздействие факела попутного газа на биологическую активность почвы // Почвоведение. 2017. № 12. С. 1485–1493.
3. Алексеева М.Н., Перемитина Т.О., Яценко И.Г. Применение спутниковых данных для выявления и картографирования высокотемпературных участков нефтедобывающих территорий Западной Сибири // Оптика атмосф. и океана. 2016. Т. 29, № 6. С. 525–528.
4. Кочергин Г.А., Курпьянов 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.

5. Мясина 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.
6. Яценко И.Г., Сваровская Л.И., Алексеева М.Н. Оценка экологического риска сжигания попутного нефтяного газа в Западной Сибири // Оптика атмосф. и океана. 2014. Т. 27, № 6. С. 560–564.
7. Алексеева М.Н., Яценко И.Г., Перемитина Т.О. 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.
8. Elvidge C.D. Estimation of gas flaring volumes using NASA MODIS fire detection products [Electronic resource]. URL: https://ngdc.noaa.gov/eog/interest/gas_flares.html (дата обращения: 30.01.2019).
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. V. 9(1). P. 14. DOI: 10.3390/en9010014.
10. Chowdhury S., Shipman T., Chao D., Elvidge C.D., Zhizhin M., Hsu F. Daytime gas flare detection using Landsat-8 multispectral data // IEEE Geosci. Remote Sens. Sympos.: Quebec City, Canada. 2014. [Electronic resource]. URL: http://www.academia.edu/21083575/Daytime_gas_flare_detection_using_Landsat-8_multispectral_data (last access: 30.01.2019)
11. Генихович Е.Л., Берлянд М.Е., Грачева И.Г., Елисеев В.С., Зив А.Д., Оникул Р.И., Филатова Е.Н., Хуршудян Л.Г., Чигерин С.С., Яковлева Е.А. Оперативная модель расчета концентраций, осредненных за длительный период // Тр. ГГО. 1998. Вып. 549. С. 11–31.
12. Бызова Н.Л., Гаргер Е.К., Иванов В.Н. Экспериментальные исследования атмосферной диффузии и расчеты рассеяния примеси. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 278 с.
13. Рапута В.Ф., Королева Г.П., Горшков А.Г., Ходжер Т.В. Исследование процессов длительного загрязнения окрестностей Иркутска тяжелыми металлами // Оптика атмосф. и океана. 2001. Т. 14, № 6–7. С. 623–626.
14. Рапута В.Ф. Модели реконструкции полей длительных выпадений аэрозольных примесей // Оптика атмосф. и океана. 2007. Т. 20, № 6. С. 506–511.
15. Яценко И.Г., Полищук Ю.М. Трудноизвлекаемые нефти: физико-химические свойства и закономерности размещения / под ред. А.А. Новикова. Томск: В-Спектр, 2014. 154 с.
16. Яценко И.Г., Полищук Ю.М. Классификация трудноизвлекаемых нефтей и анализ их качественных свойств // Химия и технология топлив и масел. 2016. № 4(596). С. 50–56.
17. Берлянд М.Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1975. 448 с.
18. Устенский А.Б., Федоров В.В. Вычислительные аспекты метода наименьших квадратов при анализе и планировании регрессионных экспериментов. М.: Изд-во МГУ, 1975. 168 с.
19. Архив погоды в Среднем Васюгане [Электронный ресурс]. URL: <https://rp5.ru/> (дата обращения: 25.02.2019).

M.N. Alekseeva, V.F. Raputa, T.V. Yaroslavtseva, I.G. Yashchenko. Estimation of atmospheric pollution from gas flaring according to data of remote observations of flare thermal radiation.

The use of Landsat 8 satellite images made in winter allow one to detect the existing installations for associated petroleum gas flaring in the west of the Tomsk region. The zones of their thermal impact on the landscape of oil fields are determined. A model for estimating regional pollution of territories from a set of sources is suggested. The fields of relative pollution of oil producing areas in winter and summer periods are numerically reconstructed according to the data on flare thermal radiation and the estimation model.