

УДК 504.06

## Риск воздействия сжигания попутного нефтяного газа на окружающую среду

М.Н. Алексеева, И.Г. Яценко\*

*Институт химии нефти СО РАН  
634055, г. Томск, пр. Академический, 4*

Поступила в редакцию 11.02.2021 г.

Выполнен анализ рисков распространения загрязняющих веществ от факельных установок по сжиганию попутного нефтяного газа на территории нефтедобычи Томской области на основе дистанционных оптических данных Sentinel-2 и лидарных данных CALIPSO. Приведены горизонтальные поля рассеивания загрязняющих веществ над факельными установками месторождений: Первомайское, Олень, Столбовое, Катыльгинское, Ломовое, Западно-Катыльгинское и Лугинецкое. Рассчитаны площади выделов растительного покрова, находящихся в зонах рассеивания загрязняющих веществ от факелов. Также приведены вертикальные профили распространения примесей по данным лидара CALIOP, отражающие аэрозольное загрязнение атмосферы в районе факельных установок рассматриваемых в данной работе месторождений.

*Ключевые слова:* Томская область, факельные установки по сжиганию попутного нефтяного газа, зоны рассеивания загрязняющих веществ, растительный покров, профили лидара CALIOP, космические снимки Sentinel-2, программы Sen2Cor и SNAP; Tomsk Region, associated petroleum gas flares, pollutant dispersion zones, vegetation cover, CALIOP lidar profiles, Sentinel-2 space images, Sen2Cor and SNAP programs.

### Введение

Томская область (ТО) является индустриальным регионом с высоким уровнем развития нефтегазодобывающей и нефтехимической промышленности. По состоянию на 1 января 2020 г. в области открыто 139 месторождений углеводородов, в том числе 108 нефтяных, 21 нефтегазоконденсатных и 10 газоконденсатных [1]. В ТО объем добычи газа и нефти по итогам 2019 г. составил 4,6 млрд м<sup>3</sup> и 8,5 млн т соответственно [2]. В 2017 г. объем добычи попутного нефтяного газа составил 1,7 млрд м<sup>3</sup>, из них 0,3 млрд м<sup>3</sup> (18%) было сожжено на факелах [3].

В настоящей работе проведен анализ рисков распространения загрязняющих веществ (ЗВ) (оксид углерода, сажа, диоксид азота, метан) от факельных установок (ФУ) месторождений на территории нефтедобычи в ТО на основе спутниковых данных, позволяющих оценивать уровень атмосферного распространения примесей и степень загрязнения наземных ландшафтов. Целью работы является оценка распространения ЗВ от ФУ на территории ТО. В рамках поставленной цели с применением данных дистанционного зондирования решались следующие задачи: 1) оценка вертикального распространения загрязняющих веществ от ФУ в атмосфере; 2) дешифрирование растительного покрова выделов (или участков), попавших в зоны горизонтального воздушного распространения ЗВ от ФУ.

### Объекты и методы исследования

Объект исследования – территория лесоболотных комплексов, расположенных в районе нефтегазодобывающих предприятий Каргасокского и Парабельского районов. Каргасокский муниципальный район площадью 86857 км<sup>2</sup> относится к Западно-Сибирскому средне-таежному равнинному району. Площадь леса в Каргасокском районе, по официальным данным, составляет 84061,73 км<sup>2</sup>. В районе добывается значительная часть углеводородного сырья: в 2019 г. добыто 4,66 млн т нефти и 2,3 млрд м<sup>3</sup> природного и попутного газов (54,8 и 50% от общей добычи в ТО соответственно) [4]. Площадь Парабельского района – 35051 км<sup>2</sup>, лесами занято 34929,65 км<sup>2</sup>. Общие запасы нефти в районе оцениваются примерно в 66 млн т, газа – 140 млн м<sup>3</sup>, конденсата – в 20 млн т. [5].

В настоящей работе были применены дистанционные методы исследования с использованием данных Sentinel-2 в сети Интернет космических снимков (КС) Sentinel-2 и лидарных данных CALIOP – профилей подтипов аэрозоля. КС Sentinel-2 были обработаны современными методами атмосферной коррекции и статистической кластеризации.

### Вертикальные профили распространения примесей

Ранее в [6] был предложен алгоритм восстановления значений температуры земной поверхности для детектирования факельных установок. Было обнаружено 14 факельных установок на территории

\* Мария Николаевна Алексеева (amn@ipc.tsc.ru); Ирина Германовна Яценко (sric@ipc.tsc.ru).

12 месторождений ТО и выполнено картирование зон рассеивания загрязняющих веществ от ФУ [7]. В настоящей работе авторы совместили цифровую карту с векторным слоем ФУ, составленную по КС Landsat-8 с датами съемки 20 и 22 марта 2017 г. из работы [6], с современным цифровым слоем очагов пожаров NASA EOS [8] за 2020 г. Выявлено, что очаги горения, обнаруженные NASA в 2020 г., идентифицируются как действующие ФУ.

На рис. 1 приведены источники антропогенного аэрозоля (действующие ФУ и вахтовые поселки) на территории Каргасокского и Парабельского районов и зоны рассеивания ЗВ от указанных источников. Поля концентраций относительного регионального загрязнения (далее зоны рассеивания ЗВ) от ФУ построены на основе данных о тепловом излучении от действующих ФУ и метеопараметров [7].

Из построенных полей были обведены контуром ближайшие к факелам зоны с наибольшими концентрациями примесей (рис. 1): А – зона рассеивания ЗВ от факелов на месторождениях Первомайское, Олень, Столбовое, Катыльгинское, Ломовое и Западно-Катыльгинское; зона В – от факелов Лугинского и Шингинского месторождений; зона С – от факела Южно-Черемшанского месторождения; зона D – от факела Герасимовского месторождения; зона E – от факелов Крапивинского и Двуреченского месторождений.

Для анализа состояния аэрозоля над ФУ в зонах рассеивания ЗВ применялись данные спутника CALIPSO лидара CALIOP с датами съемки 12 февраля, 4 апреля и 5 мая 2020 г. Траектории движения спутника приведены на рис. 1, а профили подтипов аэрозоля указаны на рис. 2.

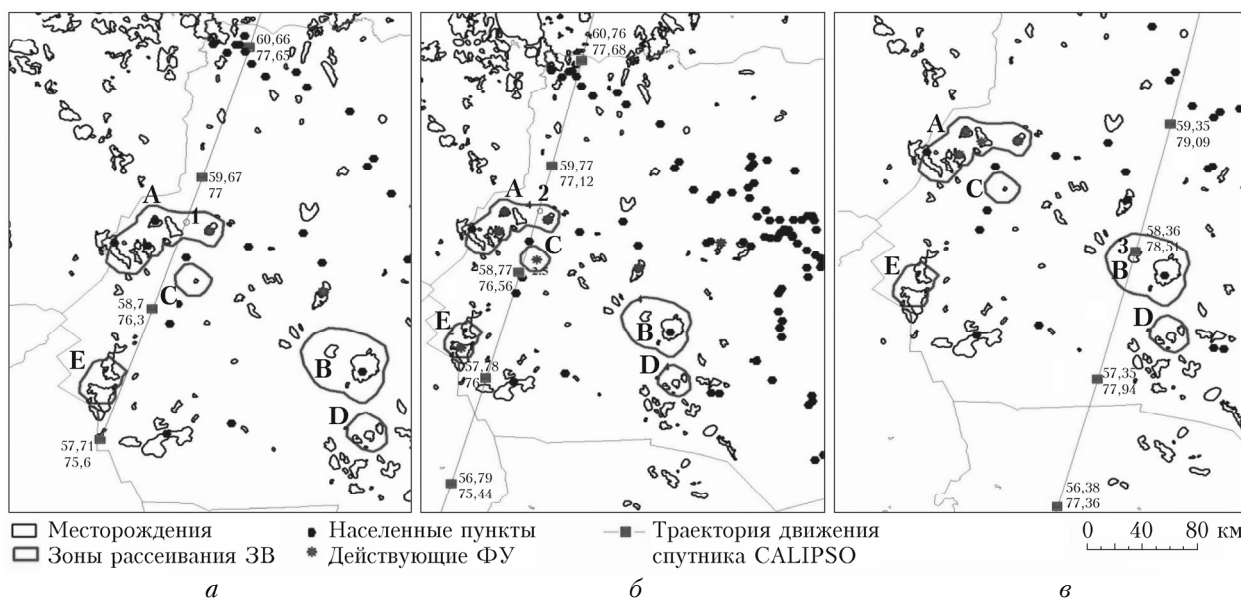


Рис. 1. Расположение источников антропогенного аэрозоля и зоны (А, В, С, D, E) рассеивания ЗВ от действующих ФУ месторождений ТО; линии – траектории CALIPSO в географическом пространстве с датами съемки: а – 12.02; б – 4.04; в – 5.05.2020 г.; цифрами обозначены точки измерения аэрозоля в зонах рассеивания ЗВ (цвет рисунок см. на сайте <http://iao.ru/ru/content/vol.34-2021/iss.06>)

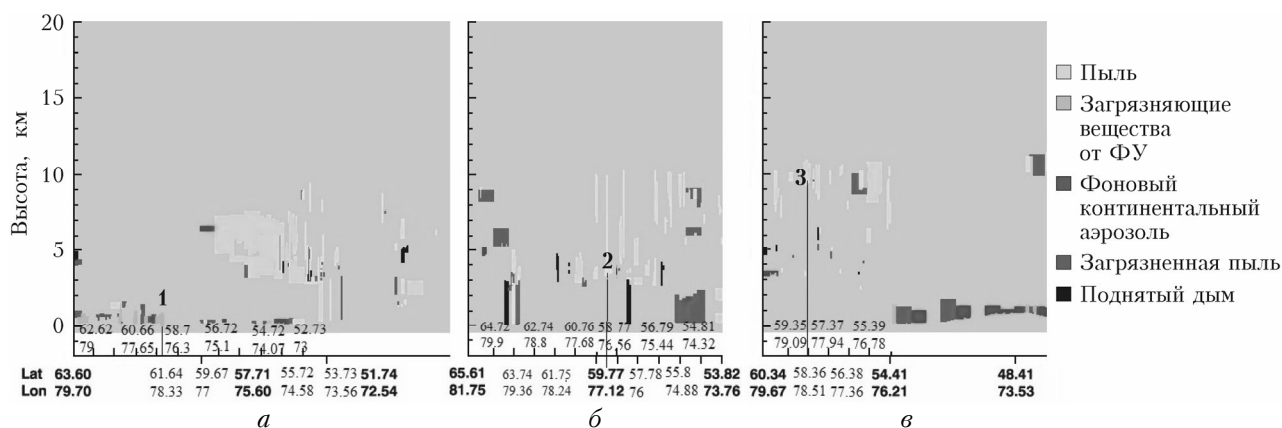


Рис. 2. Профиль подтипов аэрозоля по данным лидара CALIOP с датами съемки: а – 12.02; б – 4.04; в – 5.05.2020 г. Цифрами 1, 2, 3 обозначены точки в зонах рассеивания ЗВ в соответствии с рис. 1, а, б, в (цвет рисунок см. на сайте <http://iao.ru/ru/content/vol.34-2021/iss.06>)

На профиле лидара CALIOP 12 февраля 2020 г. в зоне рассеивания ЗВ от ФУ месторождений Столбовое, Ломовое и Катильгинское в точке 1 на высоте от 30 м до 1 км зафиксированы загрязненный континентальный аэрозоль и дым (рис. 2, а); 4 апреля 2020 г. в этой же зоне зафиксирована пыль на высоте от 3 до 10 км (рис. 2, б). В зоне ФУ Шингинского и Лугинецкого месторождений (рис. 2, в) зафиксирована также пыль на высоте 10 км. Как известно, пыль может содержать частички сажи и различные механические взвеси.

Установлено [6], что наибольшую часть выбросов от горения газа ФУ составляет СО (65–80%), доля сажи – 10%. Выбросы диоксида азота NO<sub>2</sub> – от 1 до 3%. В снеге непосредственно под ФУ обнаруживаются бензапирен и тяжелые металлы [9].

## Горизонтальные поля рассеивания загрязняющих веществ и риск деградации растительного покрова

Зоны рассеивания ЗВ, построенные с помощью ArcGIS 10.2.2 [7], были совмещены с картой лесов и болот соответствующих территорий (рис. 3). Карта лесов на основе КС с пространственным разрешением 345 м составлена в 2010 г. Институтом космических исследований РАН [10]. Карта болот на основе КС с пространственным разрешением 500 м построена в 2018 г. авторами с помощью продукта MCD12Q1.

Для решения поставленных задач необходима цифровая карта растительности района более крупного

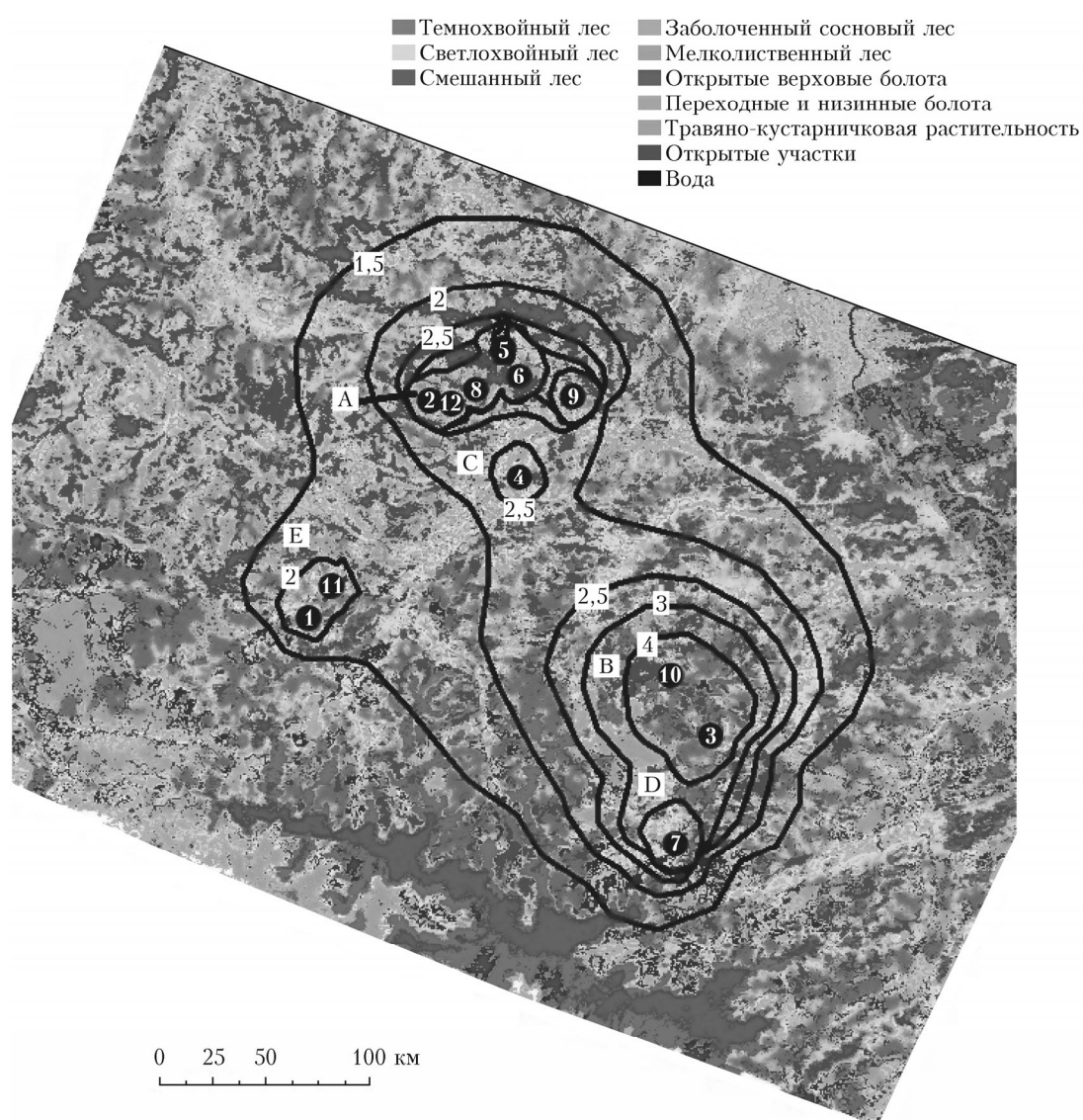


Рис. 3. Карта растительного покрова юго-западной части ТО среднего масштаба с наложенными зонами рассеивания ЗВ (А, В, С, D и E) от факелов месторождений. Зона А включает ФУ на месторождениях: 2 – Первомайское, 5 – Олень, 6 – Столбовое, 8 – Катильгинское, 9 – Ломовое, 12 – Западно-Катильгинское; зона В: 3 – Лугинецкое, 10 – Шингинское; зона С: 4 – Южно-Черемшанское; зона D: 7 – Герасимовское; зона E: 1 – Крашвинское, 11 – Двуреченское (цв. рисунок см. на сайте <http://iao.ru/ru/content/vol.34-2021/iss.06>)

масштаба, для чего в настоящей работе применена методика обработки KC Sentinel-2 Европейского космического агентства (ESA). Для пользователя в открытом доступе сформирован продукт L1C, состоящий из 13 снимков в видимой, ближней инфракрасной и коротковолновой инфракрасной частях спектра с высоким пространственным разрешением (10–20 м). L1C – это ортотрансформированный продукт, который включает информацию о географических и радиометрических коэффициентах калибровки дешифрирования KC Sentinel-2.

Для получения KC Sentinel-2 более высокого уровня обработки L2A необходимы процедуры атмосферной коррекции, классификации сцен и вычисления параметров атмосферы. В нашей работе атмосферная коррекция исходных KC Sentinel-2 проводится с использованием плагина Sen2Cor, разработанного ESA [11, 12]. Для рассматриваемой территории нефтедобычи были подобраны следующие космические снимки Sentinel-2: T43VEF\_10062020, T43VEF\_16072020, T43VFF\_11092020 (зона А); T44VLK\_11082020 и KC T44VLJ\_11082020 (зоны В и D), T43VEF\_10062020, T43VFF\_18072020 (зона С), T43VEE\_18.07.2020 (зона Е). В результате обработки перечисленных KC Sentinel-2 программой Sen2Cor были получены цветные синтезированные изображения высокого разрешения (10, 20 и 60 м, рис. 3).

Классификация KC Sentinel-2 проводилась в разработанной ESA программе SNAP 8.0 [13]. Использован метод Expectation Maximization EM Cluster Analysis. В статистике алгоритм максимизации ожидания – это итерационный метод для поиска оценок максимального правдоподобия или максимальных апостериорных оценок параметров в статистических моделях, где модель зависит от ненаблюдаемых скрытых данных. В таком методе кластеры рассчитываются исходя из априорной вероятности и ковариационной матрицы.

Для анализа состояния растительности, подверженной аэрозольному загрязнению, из классифицированных KC Sentinel-2 вырезались зоны рассеивания ЗВ (А, В, С, D и Е, указанные на рис. 3).

Как видно из таблицы, в зоне А выявлено, что наиболее подвержены неблагоприятному воздействию темнохвойные леса (21%) и верховые болота (30%). В зоне рассеивания В и Е наиболее распространены и, следовательно, подвержены наибольшему воздействию ЗВ темнохвойные леса (1/3 общей площади зоны В и 27% от зоны Е). В зоне С возможен высокий риск деградации светлохвойных лесов (20%) и заболоченных сосновых лесов низкого бонитета (рямов) (16%). В зоне рассеивания ЗВ от ФУ Герасимовского месторождения (зона D) распространены верховые открытые болота (28%) и сосновые леса (18%).

Выявлено [14], что в зонах воздействия источников воздушного загрязнения усиливается изреживание крон хвойных деревьев. Так, например, в условиях умеренного загрязнения в молодых древостоях сосны около 80% деревьев изрежены более чем на 30%, а 16% из них полностью лишены хвои. Индексы жизненного состояния древостоев, определяемые степенью дефолиации крон деревьев, являются широко используемыми показателями в мониторинге лесных экосистем. Важные биоиндикационные показатели темнохвойных деревьев – продолжительность жизни хвои, длина прироста побегов и масса – 100 штук хвоинок первого и второго года жизни кедра и ели. Установлено [14], что масса хвои, как и степень охвоенности, увеличивается по мере удаления от факела.

Мохово-лишайниковая растительность способна чутко реагировать даже на самые небольшие загрязнения атмосферы, например, известно [15] накопление тяжелых металлов и исчезновение напочвенных видов лишайников в составе мохово-лишайникового яруса.

Площади выделов растительного покрова в результате классификации KC Sentinel-2, км<sup>2</sup>

Зона рассеивания ЗВ	Темнохвойный лес (ель, кедр)	Светлохвойный лес (сосна)	Смешанный лес	Заболоченный сосновый лес	Мелколиственный лес	Верховые открытые болота	Переходные и низинные болота	Травяно-кустарничковые экосистемы на месте гарей и вырубок	Остальные (вода и техногенные объекты)	Всего
А	548,92 (21%)	36,28 (1%)	208,78 (8%)	369,13 (14%)	173,83 (7%)	769,40 (30%)	210,95 (8%)	92,26 (4%)	170,25 (7%)	2579,79 (100%)
В	954,81 (33%)	318,68 (11%)	382,54 (13%)	–	439,02 (15%)	198,72 (7%)	88,87 (3%)	453,53 (16%)	17,62 (1%)	2853,79 (100%)
С	23,64 (5%)	103,23 (20%)	77,77 (15%)	84,41 (16%)	15,87 (3%)	13,43 (3%)	66,10 (13%)	115,69 (22%)	15,31 (3%)	515,45 (100%)
D	103,39 (15%)	119,37 (18%)	16,66 (2%)	102,2 (15%)	58,50 (9%)	189,72 (28%)	68,63 (10%)	–	21,17 (3%)	679,64 (100%)
Е	245,01 (27%)	–	157,21 (18%)	136,95 (15%)	149,80 (17%)	93,91 (11%)	73,84 (8%)	35,72 (4%)	1,08 (0,1%)	893,51 (100%)

## Заключение

Показано, что использование новых дистанционных данных перспективно и актуально для мониторинга состояния окружающей природной среды Томской области, особенно на территориях нефте- и газодобычи.

Так, на профиле лидара CALIOP в зоне рассеивания загрязняющих веществ от факельных установок Васюганской группы месторождений зафиксирован дым на высоте от 30 м до 1 км. Здесь же 12 февраля 2020 г. определены дым и пыль с высотой рассеивания от 3 до 10 км.

Для картографирования растительного покрова высокого разрешения адаптирована методика обработки космических снимков Sentinel-2 с использованием программ ESA. Показано, что в зонах рассеивания А, В, Е наибольшему риску деградации подвержены темнохвойные леса, занимающие 21, 33 и 27% территорий зон соответственно. В зонах С и D наиболее важно проводить фитомониторинговые исследования состояния светлохвойных пород деревьев, занимающих 20 и 18% общих площадей указанных зон.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИХН СО РАН, финансируемого Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (НИОКТР 121031500046-7).

1. *Государственный доклад о состоянии и охране окружающей среды Томской области в 2019 году*. ОГБУ «Облком-природа». [Electronic resource]. URL: [https://ogbu.green.tsu.ru/?page\\_id=1456](https://ogbu.green.tsu.ru/?page_id=1456) (дата обращения: 1.02.2021).
2. *Власти ожидают роста добычи нефти в Томской области*. [Electronic resource]. URL: <https://www.riatomsk.ru/article/20210122/dobicha-nefti-tomskaaya-oblastj-rost-ekonomiki/> (дата обращения: 1.02.2021).
3. *Экологический мониторинг: доклад о состоянии окружающей природной среды в Томской области в 2017 году*: Департамент природных ресурсов и охраны окружающей среды Томской области. ОГБУ «Облком-природа». Томск: Дельтаплан, 2018. 158 с.
4. *Добыча по Каргасокскому району* [Electronic resource]. URL: <http://www.kargasok.ru/economics.html> (дата обращения: 1.02.2021).
5. *Природные ресурсы*. Парабельский район [Electronic resource]. URL: <https://www.tomsk.gov.ru/Parabelskiy-rayon-nature-res> (дата обращения: 1.04.2021).
6. *Алексеева М.Н., Яценко И.Г.* Алгоритм детектирования факельных установок по сжиганию попутного нефтяного газа и оценка объемов выбросов вредных веществ // *Оптика атмосф. и океана*. 2019. Т. 32, № 6. С. 490–494.
7. *Алексеева М.Н., Рапута В.Ф., Ярославцева Т.В., Яценко И.Г.* Оценка атмосферного загрязнения при сжигании попутного газа по данным дистанционных наблюдений теплового излучения // *Оптика атмосф. и океана*. 2019. Т. 32, № 11. С. 915–919; *Alekseeva M.N., Raputa V.F., Yaroslavtseva T.V., Yashchenko I.G.* Estimation of air pollution due to gas flaring from remote observations of flare thermal radiation // *Atmos. Ocean. Opt.* 2020. V. 33, N 3. P. 289–294.
8. *FIRMS* [Electronic resource]. URL: <https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov> (last access: 1.02.2021).
9. *Рапута В.Ф.* Экспериментальные и численные исследования аэрозольных выпадений примесей в окрестности нефтегазового факела // *Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Серия: математика, механика, информатика*. 2013. Т. 13, № 3. С. 96–102.
10. *Карты* [Electronic resource]. URL: <http://smiswww.iki.rssi.ru/default.aspx?page=317> (дата обращения: 5.01.2021).
11. *Main-Knorn M., Louis J.* Sen2Cor for Sentinel-2. [Electronic resource]. URL: <https://www.researchgate.net/publication/320231869> (last access: 5.01.2021).
12. *Бочка Л.А., Кашицкий А.В.* Макет потоковой обработки данных SENTINEL-2 // *Вестн. Тверск. гос. ун-та. Сер. география и геоэкология*. 2018. № 3. С. 40–56.
13. *STEP-Scientific* Toolbox Exploitation Platform [Electronic resource]. URL: <http://step.esa.int/main> (last access: 20.01.2021).
14. *Полищук Ю.М., Кокорина Н.В., Кочергин Г.А., Перемитина Т.О., Токарева О.С.* Методология оценки экологического риска воздействия точечных источников атмосферного загрязнения на основе данных биоиндикации // *Риск экологический. Проблемы анализа риска*. 2011. Т. 8, № 4. С. 22–35.
15. *Опекунова М.Г., Гизетдинова М.Ю.* Использование лишайников в качестве биоиндикаторов загрязнения окружающей среды // *Вестн. Санкт-Петербургского ун-та*. 2014. № 7, вып. 1. С. 79–94.

*M.N. Alekseeva, I.G. Yashchenko. Risk of environmental impact when flaring associated petroleum gas.*

The risks of propagation of pollutants from flare installations when flaring associated petroleum gas in the oil production area of the Tomsk region were analyzed on the basis of remote optical data from Sentinel-2 and lidar data from CALIPSO. The horizontal fields of dispersion of pollutants over flare installations of the following fields are given: Pervomayskoye, Olenye, Stolbovovoe, Katylginskoe, Lomovoe, Zapadno-Katylginskoe, and Luginetskoe. The areas of vegetation cover located in the zones of dispersion of pollutants from the flares are calculated. The vertical profiles of the propagation of impurities are given according to the CALIOP lidar data, reflecting aerosol pollution of the atmosphere in the area of flare installations of the fields considered in this work.