Спутниковый мониторинг состояния окружающей природной среды в зоне воздействия нефтегазового комплекса Томской области

М. Н. Алексеева, И. Г. Ященко

Институт химии нефти СО РАН, Томск, 634055, Россия E-mail: amn@ipc.tsc.ru

Работа посвящена мониторинговым исследованиям состояния окружающей природной среды нефтедобывающих районов Томской обл. с использованием дистанционных данных. Актуальность работы обусловлена существующей проблемой сжигания попутного нефтяного газа на факельных установках (ФУ). В статье представлены картографические, графические и численные данные воздушного распространения загрязняющих веществ (ЗВ) при сжигании попутного нефтяного газа, построенные с помощью дистанционных методов исследования и доступных в интернете космических снимков Sentinel-2, продуктов MOD04 и лидарных данных CALIOP. Показано, что в зонах рассеивания от факельных установок на Васюганской и Лугинецкой группах месторождений, а также от факельных установок Крапивинского и Двуреченского месторождений наибольшему риску деградации подвержены темнохвойные леса, занимающие 21, 33 и 27 % территорий зон соответственно. В зонах рассеивания ЗВ от факельных установок Южно-Черемшанского и Герасимовского месторождений наиболее уязвимы светлохвойные породы деревьев, занимающие 20 и 18 % площади зон соответственно. Приведены величины аэрозольной оптической толщины атмосферы (АОТ) по оптическим данным МОD04_3к непосредственно над факелами. Сравнительный анализ между значениями АОТ над площадками с действующими факелами и близстоящими метеостанциями показывает, что в трёх из пяти случаев показатели АОТ в районе расположения ФУ Двуреченского, Крапивинского, Лугинецкого, Шингинского и Южно-Черемшанского месторождений не превышают фоновые, а для месторождений Оленье, Столбовое, Первомайское во все указанные даты отмечается превышение АОТ в воздухе по сравнению с фоном. Приемлемое состояние атмосферы с незначительным антропогенным аэрозолем над ФУ некоторых месторождений связано с применением современных технологий по утилизации попутного нефтяного газа АО «Томскнефть». Установлено, что на профиле лидара CALIOP в зоне рассеивания ЗВ от ФУ Васюганской группы месторождений (Столбовое, Катыльгинское) 12.02.2020 зафиксирован дым на высоте от 30 м до 1 км и 04.04.2020 определена пыль на высоте от 3 до 10 км. Приведённые исследования демонстрируют широкие возможности спутникового мониторинга состояний биосферы и атмосферы для выявления риска техногенного аэрозольного и теплового воздействия в условиях нефте- и газодобычи.

Ключевые слова: месторождения нефти и газа, Томская область, попутный нефтяной газ, факельные установки, растительный покров, спутниковые данные Sentinel-2, продукты MOD04, данные лидара CALIPSO

Одобрена к печати: 17.12.2021 DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-1-158-169

Введение

Томская обл. — индустриальный регион с высоким уровнем нефтегазодобывающего и нефтехимического развития. По состоянию на 01.01.2020 в области открыто 139 месторождений углеводородов, в том числе 108 нефтяных, 21 нефтегазоконденсатных и 10 газоконденсатных. Добыча углеводородного сырья в 2019 г. в целом по Томской обл. составила 13,6 млн т условных углеводородов, в том числе нефти — 8,5 млн т; газа — 4,6 млрд м³, конденсата — 0,5 млн т. Основными нефтегазодобывающими компаниями являются: АО «Томскнефть», ОАО «Томскгазпром», ООО «Газпромнефть-Восток». В Томской обл. ежегодно добывается около 2 млрд м³ попутного нефтяного газа (ПНГ), при этом в 2019 г. в факельных установках (ФУ) было сожжено примерно 16,6 % (https://ogbu.green.tsu.ru/?page_id=1456).

В настоящей работе проведён анализ распространения загрязняющих веществ (ЗВ) от действующих факельных установок месторождений Томской обл. на основе спутниковых данных, позволяющих оценивать уровень атмосферного распространения примесей и степень загрязнения наземных ландшафтов. Цель работы — оценка риска загрязнения атмосферы и растительного покрова при сжигании ПНГ на ФУ. В рамках поставленной цели необходимо было решить следующие задачи: 1) оценка атмосферного распространения ЗВ при сжигании ПНГ с применением дистанционных оптических данных космических снимков (КС) Sentinel-2, MOD04, лидара CALIPSO (англ. Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation) и специальных компьютерных программ; 2) дешифрирование спутниковых изображений для типизации растительного покрова участков, попавших в зоны атмосферного распространения загрязняющих веществ от ФУ; 3) анализ площадей типов растительного покрова, находящихся в условиях аэрозольного и теплового воздействия.

Объекты и методы исследования

Объектами исследования стали растительность лесоболотных комплексов и состав ЗВ атмосферы на территории нефтегазодобывающих предприятий Каргасокского и Парабельского районов Томской обл. Каргасокский муниципальный район площадью 86 857 км² относится к Западно-Сибирскому средне-таёжному равнинному району. Площадь леса в Каргасокском р-не по официальным данным составляет 84 061,73 км². Основные полезные ископаемые Каргасокского р-на — это нефть и газ. Запасы нефти — 913,8 млн т, газа — $25 \,\mathrm{млрд}\,\mathrm{m}^3$, конденсата — $12 \,\mathrm{млн}\,\mathrm{т}$. В районе добывается значительная часть углеводородного сырья от общей добычи в Томской обл.: в 2019 г. добыто 4,66 млн т нефти и 2,3 млрд м³ природного и попутного газа (http://www.kargasok.ru/economics.html). Площадь Парабельского р-на составляет 35 051 км², лесами занято 34 929,65 км². Общие запасы нефти в районе оцениваются примерно в 66 млн т, газа — в 140 млн м 3 , конденсата — в 20 млн т (https://www.tomsk.gov.ru/Parabelyskiy-rayon-nature-res). Ежегодно предприятиями нефтегазодобычи в районе добывается 1,6 млн т нефти, 1,4 млрд м³ газа и 150,8 тыс. т конденсата. Спутниковый мониторинг воздушного загрязнения проводился на территории 12 месторождений: Двуреченского, Западно-Катыльгинского, Ломового, Катыльгинского, Крапивинского, Оленьего, Первомайского, Столбового, Шингинского, Южно-Черемшанского (Каргасокский р-н), Герасимовского и Лугинецкого (Парабельский р-н).

В работе были применены дистанционные методы исследования с использованием доступных в интернете KC Sentinel-2, продуктов MOD04 и лидарных данных CALIOP (англ. Cloud-Aerosol Lidar with Orthogonal Polarization). Космические снимки Sentinel-2 с датами съёмки 10.06.2020, 16.07.2020, 18.07.2020, 11.08.2020 и 11.09.2020 были обработаны современными методами атмосферной коррекции и статистической кластеризации (Бочка, Кашницкий, 2018; Main-Knorn et al., 2017) (http://step.esa.int/main). На КС Sentinel-2 были классифицированы типы леса в соответствии с картой лесного покрова России (Proba-V/MOD) пространственного разрешения 345 м, составленной Институтом космических исследований РАН в 2010 г. (http://smiswww.iki.rssi.ru/default.aspx?page=317). Типы верховых, низинных и переходных болот были выделены и картографированы на снимках MCD12Q1 2018 г. на основе схемы, приведённой в работе (Савичев, 2009). MCD12Q1 с пространственным разрешением 500 м — комбинированный информационный продукт, созданный НАСА (Национальное управление по аэронавтике и исследованию космического пространства, англ. NASA — National Aeronautics and Space Administration) на основе данных спектрорадиометра среднего разрешения MODIS (англ. Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) спутников Terra и Aqua. Продукт MCD12Q1 представлен ежегодными (2001–2019) растровыми слоями типов земного покрова, полученными на основе шести различных схем классификации.

В настоящее время для оценки состояния оптических свойств атмосферы и аэрозоля перспективно применение пассивных и активных спутниковых измерений на базе приборов MODIS и CALIPSO, входящих в состав американо-французской орбитальной группировки

спутников A-train (Густокашин, Катаев, 2018). В данной работе используется продукт MODIS второго уровня MOD04_3k с пространственным разрешением 3×3 км. Продукт MOD04_3k отражает оптические свойства атмосферного аэрозоля (оптическую толщину и распределение по размерам). Данные со спутникового прибора CALIOP, поступающие из одной и той же географической точки каждые 16 дней и имеющие разрешение 333 м, позволяют определить подтипы аэрозоля.

Загрязнение атмосферы от факельных установок

Ранее в работе (Алексеева, Ященко, 2019) был предложен алгоритм восстановления значений температуры земной поверхности для детектирования факельных установок. Было выявлено 14 факельных установок на территории рассматриваемых 12 месторождений Томской обл. В настоящем исследовании авторы совместили цифровую карту с векторным слоем ФУ, составленную по КС Landsat-8 с датами съёмки 20.03.2017 и 22.03.2017 из работы (Алексеева, Ященко, 2019), с актуальным векторным тематическим слоем очагов пожаров по данным HACA EOS (anea. Earth Observing System) 3a 2020 г. (https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov). Авторами установлено, что точечные очаги горения, идентифицированные НАСА, соответствуют действующим в 2020 г. ФУ, что подтверждает корректность полученных результатов и их точность. В работе (Алексеева и др., 2019) проведено моделирование полей концентрации относительного регионального загрязнения от групп ФУ с использованием КС Landsat-8. При этом предполагали, что выделение тепла пропорционально мощности эмиссии от каждого факела, и среди других параметров использовали значение яркостной температуры пикселя с ФУ, полученное из КС Landsat-8. На рис. 2, 4, 5 приведены векторные, оцифрованные в ArcGIS согласно источнику (Алексеева и др., 2019) зоны рассеивания ЗВ (или аналогично поля концентрации примесей в атмосфере от групп ФУ), выраженные в град·с·м⁻³. Далее в работе рассмотрим фактические дистанционные данные, отражающие состояние атмосферы в районе ФУ.

В настоящее время по величине аэрозольной оптической толщины (АОТ) определяются запылённость атмосферы и принос антропогенного и минерального аэрозоля с воздушными массами. Показано (Плахина и др., 2018), что с повышением запылённости возрастает величина АОТ. В аридных районах при слабой запылённости атмосферы и фоновой пылевой дымке в дневном ходе АОТ наблюдается минимум в середине дня, а максимум — ночью (Маслов и др., 2018).

Для оценки АОТ над ФУ исследуемых месторождений Томской обл. были определены значения продуктов MOD04_3k в соответствии с датами съёмки других спутниковых продуктов: оптических КС Sentinel-2 и профилей лидара CALIOP, используемых в данной работе. На *рис. 1* приведён фрагмент карты АОТ, полученный в 06:35 UT (*англ.* Universal Time, всемирное время) 05.05.2020. На карте видно, что АОТ исследуемой территории изменяется от 0 до 0,5, преобладают значения 0,005–0,2, что указывает на относительно низкую запылённость атмосферы территории (см. *рис. 1*, см. с. 161).

С помощью карт были установлены значения АОТ непосредственно над факелами и на метеостанциях «Катыльга», «Кунтики» и «Пудино» вблизи указанных месторождений; результаты приведены в *табл. 1*, где серым цветом отмечены значения АОТ с превышением уровня фона, определённого по данным метеостанций (см. *puc. 1*). В *табл. 1* показаны значения температуры воздуха и относительной влажности, измеренные на высоте 2 м над землёй на действующей метеостанции «Пудино». В указанные даты относительная влажность воздуха варьирует от 32 до 51 %. Температура воздуха изменяется от 9,6 °C весной до 29 °C летом (см. *табл. 1*).

Значения АОТ в районе ФУ месторождений Оленье, Столбовое, Катыльгинское, Западно-Катыльгинское, Первомайское, а также Ломовое и Южно-Черемшанское сравнивались с фоновыми значениями АОТ в районе метеостанции «Катыльга» (см. рис. 1, табл. 1). Значения АОТ над ФУ Двуреченского и Крапивинского месторождений сравнивались с фоновыми значениями в месте расположения метеостанции «Кунтики» (см. рис. 1, табл. 1). Значения

АОТ над ФУ Лугинецкого, Шингинского и Герасимовского месторождений сравнивались с фоновыми значениями АОТ на метеостанции «Пудино» (см. рис. 1, табл. 1).

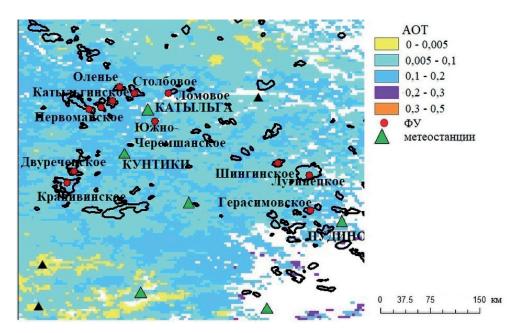
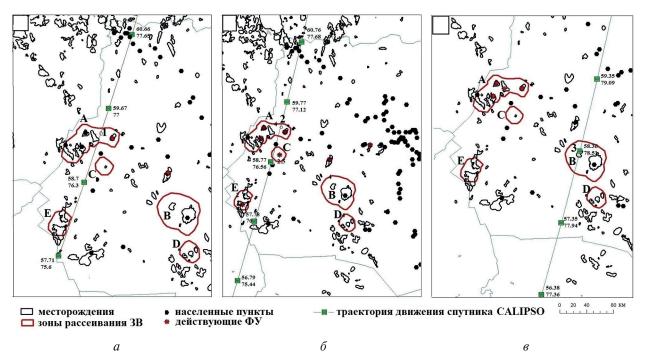


Рис. 1. Карта АОТ за 05.05.2020 в районе размещения месторождений

Таблица 1. Значения АОТ в районах расположения факельных установок

Месторождение	Дата, время (UT) съёмки											
	05.05.2 06:3	,	10.06.2 06:1	. ,	16.07.2 07:2	,	18.07.2 05:3	,	11.08.2 06:2	,		
			Зна	чения	ия AOT no MOD04_3k							
1. Оленье	0,1	1	0,2	5	0,5	8	0,2	6	0,5	7		
2. Столбовое	0,1	3	0,3	1	0,6	2	0,2	4	0,6	5		
3. Катыльгинское	0,1	0	0,2	7	0,5	0	0,2	0	0,4	3		
4. Западно-Катыльгинское	0,0	5	0,3	2	0,5	4	0,2	6	0,4	4		
5. Первомайское	0,0	7	0,3	0	0,6	3	0,2	5	0,4	1		
6. Ломовое	0,1	3	0,3	0	0,5	1	0,2	2	0,7	4		
7. Южно-Черемшанское	0,12		0,19		0,43		0,20		0,42			
8. Двуреченское	0,09		0,51		0,21		0,22		0,26			
9. Крапивинское	0,05		0,43		0,28		0,23		0,26			
10. Шингинское	0,08		_		0,36		0,09		0,39			
11. Лугинецкое	0,07		_		0,40		0,09		0,36			
12. Герасимовское	0,17				0,34		0,11		0,37			
13. Фоновые данные метеостанции «Катыльга»	0,06		0,23		0,47		0,23		0,37			
14. Фоновые данные метеостанции «Кунтики»	0,0	0,07		0,52		0,24		0,20		0,49		
15. Фоновые данные метеостанции «Пудино»	0,12		_		0,34		0,09		0,33			
	Кли	мат	ические	г дан	ные на .	мете	останции «Пудино»					
16. Метеостанция «Пудино»	T	f	T	f	T	f	T	f	T	f		
	9,6	48	22,4	51	28,6	50	24,1	41	28,9	32		

 Π р и м е ч а н и е: T — температура воздуха в °C, измеренная на высоте 2 м над землёй; f — относительная влажность воздуха в %, измеренная на высоте 2 м над землёй.



 $Puc.\ 2.$ Расположение источников антропогенного аэрозоля и зоны (A—E) рассеивания ЗВ от действующих факельных установок месторождений Томской обл. Линиями показаны траектории CALIPSO в географическом пространстве с датами съёмки: a-12.02.2020; b-04.04.2020; b-05.05.2020. Цифрами обозначены точки измерения аэрозоля в зонах рассеивания ЗВ

Как следует из *табл. 1*, значения АОТ, выявленные с помощью карт с датами 10.06.2020, 16.07.2020 и 11.08.2020 в районе расположения ФУ Двуреченского месторождения, не превышают фоновые значения АОТ в районе метеостанции «Кунтики». На месторождении Крапивинское также три дня (05.05.2020, 10.06.2020 и 11.08.2020) из пяти значения АОТ не превышают фоновые значения в районе метеостанции «Кунтики». Аналогично значения АОТ над ФУ Южно-Черемшанского месторождения три дня (10.06.2020, 16.07.2020 и 18.07.2020) из пяти не превышают фоновые значения АОТ в районе метеостанции «Катыльга». В районе ФУ Лугинецкого и Шингинского месторождений значения АОТ не превышают фоновые значения станции «Пудино» два дня (05.05.2020 и 18.07.2020) из четырёх. Приемлемое состояние атмосферы и незначительный антропогенный аэрозоль над ФУ указанных месторождений связаны с современными технологическими решениями по утилизации ПНГ АО «Томскнефть» в качестве топлива электростанций (http://www.turbine-diesel.ru/rus/node/3149; https://www.stv-tv.ru/?a=news&o=site_news&id=11267; https://neftegaz.ru/news/dobycha/512498-est-95-tomskneft-dostigla-tselevogo-pokazatelya-po-utilizatsii-png-v-krupnom-tsentre-neftedobychi/).

Над ФУ месторождений Оленье, Столбовое, Первомайское во все указанные даты отмечается превышение АОТ в воздухе по сравнению с фоновыми показаниями метеостанции «Катыльга», что свидетельствует о высокой запылённости атмосферы вокруг них.

Для анализа подтипов аэрозоля в воздухе над ΦY в зонах рассеивания 3В применялись данные спутника CALIPSO лидара CALIOP с датами съёмки 12.02.2020, 04.04.2020, 05.05.2020. Траектории движения спутника приведены на *puc. 2*, а профили подтипов аэрозоля указаны на *puc. 3* (см. с. 163).

На профиле лидара CALIOP зимой (12.02.2020) в зоне рассеивания 3В от ФУ Васюганской группы месторождений в точке 1 на высоте от 30 м до 1 км зафиксирован загрязнённый континентальный аэрозоль и дым (см. puc. 3a). Весной (04.04.2020) в этой же зоне обнаружена пыль на высоте от 3 до 10 км (см. puc. 36). В зоне Лугинецкой группы месторождений (см. puc. 36) зафиксирована также пыль на высоте 10 км. Как известно, пыль может содержать частички сажи и различные механические взвеси.

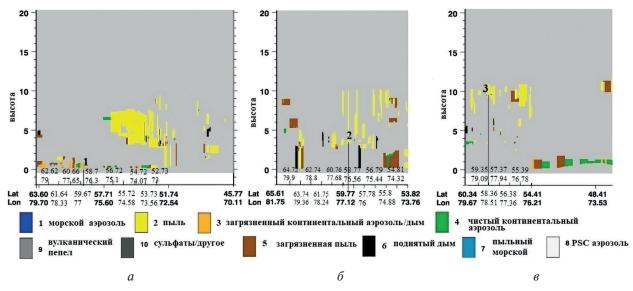


Рис. 3. Профиль подтипов аэрозоля по данным лидара CALIOP с датами съёмки: a-12.02.2020; b-04.04.2020; b-05.05.2020. Цифрами b-05.05.2020.

Установлено (Алексеева, Ященко, 2019), что наибольшую часть выбросов от горения газа ФУ составляют СО и CO_2 (65–80 %), на долю сажи приходится примерно 10 %. Выбросы диоксида азота NO_2 — от 1 до 3 %. Остальные выбросы составляют 22 %, и в их составе SO_2 (около 0,1 %), NO (0,1 %), H_2S , бутан, гексан, пентан, метан, этан, бензапирен. Кроме того, в снеговом покрове непосредственно под ФУ присутствуют бензапирен и тяжёлые металлы, отличающиеся канцерогенной активностью и высокой токсичностью (Рапута, 2013).

В результате исследований в зонах воздействия источников воздушного загрязнения выявлено (Полищук, Касаткин, 2006; Полищук и др., 2011), что атмосферное загрязнение усиливает изреживание крон хвойных деревьев. Так, например, в условиях умеренного загрязнения в молодых древостоях сосны около 80 % деревьев изреженные 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. Важными биоиндикационными показателями темнохвойных деревьев являются продолжительность жизни хвои, длина прироста побегов и масса по 100 хвоинкам первого и второго года жизни кедра и ели. В работах (Полищук, Касаткин, 2006; Полищук и др., 2011) установлено, что масса хвои, как и степень охвоенности, увеличивается по мере удаления от факела.

У лиственных пород выбросы загрязнителей вызывают огрубление листьев и ускоренное завершение вегетационного периода: ожоги, отмирание, иногда опадание листвы даже в июле; нарушение процесса фотосинтеза и дыхания; сокращение периода вырабатывания кислорода деревьями; торможение роста. Например, сажа плотно закупоривает устьица листьев и плохо смывается дождями. Мохово-лишайниковая растительность способна чутко реагировать даже на самые небольшие загрязнения атмосферы (гибель происходит, например, при концентрации сернистого газа 0,1 мг/м³).

Типы растительного покрова, находящиеся в условиях аэрозольного и теплового воздействия

На *рис.* 4 (см. с. 164) приведены источники антропогенного аэрозоля (действующие ФУ) и зоны рассевания ЗВ от указанных источников на территории Каргасокского и Парабельского районов (Алексеева, Ященко, 2019; Алексеева и др., 2019). Тематический векторный слой полигонов рассеивания ЗВ был совмещён с указанными выше региональными картами лесов

и болот соответствующих территорий (см. *puc. 4*). В границах полигонов обозначены следующие зоны с наибольшими концентрациями примесей вблизи факелов (см. *puc. 4*): А — зона рассеивания ЗВ с концентрацией 2,5 град·с·м⁻³, построенная около ФУ на месторождениях Первомайское, Оленье, Столбовое, Катыльгинское, Ломовое и Западно-Катыльгинское; В (концентрация ЗВ 4 град·с·м⁻³) — зона, построенная вокруг действующих ФУ Лугинецкого и Шингинского месторождений; С (концентрация ЗВ 2,5 град·с·м⁻³) — зона рассевания ЗВ от факела Южно-Черемшанского месторождения; D (концентрация ЗВ 4 град·с·м⁻³) — от факела Герасимовского месторождения; Е (концентрация ЗВ 2 град·с·м⁻³) — от факелов Крапивинского и Двуреченского месторождений.

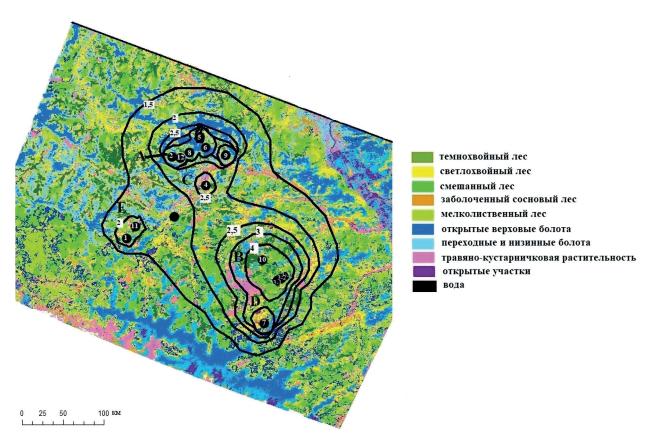


Рис. 4. Карта растительного покрова юго-западной части Томской обл. среднего масштаба с наложенными зонами рассеивания ЗВ. Изолиниями показаны концентрации ЗВ (град·с·м⁻³). Буквами А—Е обозначены зоны рассеивания с наибольшими концентрациями ЗВ от факелов месторождений. Зона А включает ФУ на месторождениях: 2 — Первомайское, 5 — Оленье, 6 — Столбовое, 8 — Катыльгинское, 9 — Ломовое, 12 — Западно-Катыльгинское. Зона В — факелы Лугинецкого месторождения с номерами 3-1, 3-2, 3-3 и факел 10 Шингинского месторождения. Зона С включает факел 4 Южно-Черемшанского месторождения. Зона D — это факел 7 Герасимовского месторождения. Зона Е — факелы 1 и 11 Крапивинского и Двуреченского месторождений соответственно

Для решения поставленных выше задач необходима цифровая карта современного растительного покрова более крупного масштаба. С этой целью в настоящей работе применена методика обработки КС Sentinel-2 Европейского космического агентства (англ. European Space Agency — 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 КС 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 КС Sentinel-2 проводилась с использованием плагина Sen2Cor, разработанного ESA (Бочка, Кашницкий, 2018; Main-Knorn et al., 2017). На рассматриваемую территорию нефтедобычи подобраны следующие космические снимки Sentinel-2: T43VEF 10062020, T43VEF 16072020, T43VFF 11092020 (зона A); T44VLK 11082020, KC T44VLJ 11082020 (зоны В и D); T43VEF_10062020, T43VFF_18072020 (зона C); T43VEE 18072020 (зона E). В результате обработки перечисленных КС Sentinel-2 с помощью программы Sen2Cor получены цветные синтезированные изображения высокого разрешения (10, 20 и 60 м).

Классификация КС Sentinel-2 для построения современных карт растительного покрова осуществлена с помощью разработанной ESA программы SNAP 8.0. (http://step.esa.int/main). Использован масштабируемый алгоритм кластеризации Expectation Maximization (EM) Cluster Analysis. В статистике это итерационный метод для поиска оценок максимального правдоподобия или максимальных апостериорных (англ. maximum a posteriori — MAP) оценок параметров в статистических моделях, где модель зависит от ненаблюдаемых скрытых данных. По данному методу кластеры рассчитываются исходя из априорной вероятности и ковариационной матрицы. В результате проведённой обработки КС Sentinel-2 построены карты современного растительного покрова с девятью типами растительности (рис. 5), выделенными по ранее описанной методике.

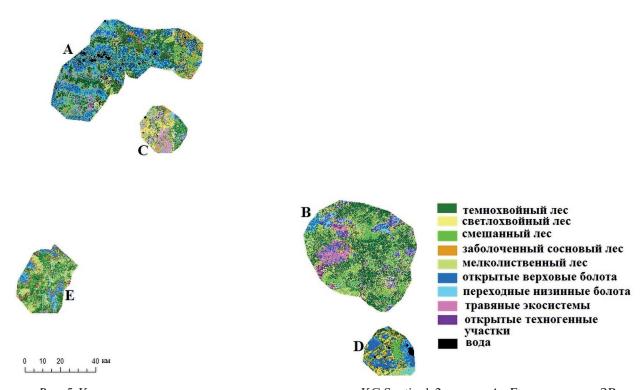


Рис. 5. Карта растительного покрова, построенная по КС Sentinel-2 в зонах A–E рассеивания 3В

Для анализа состояния растительности, подверженной аэрозольному загрязнению, из классифицированных КС Sentinel-2 вырезались зоны рассеивания 3В (A—E, указанные на puc. 4), которые представлены в виде карты растительного покрова крупного масштаба в границах соответствующих зон рассеивания (см. puc. 5). Для выбора дальнейших стратегий наземных наблюдений и определения мест фитоиндикации были рассчитаны относительные площади типов растительного покрова в зонах воздействия от Φ У. Площади типов растительного покрова в рассматриваемых зонах представлены в maбл. 2.

Как видно из *табл.* 2, в зоне A выявлено, что наибольшему неблагоприятному аэрозольному и тепловому воздействию от Φ У подвержены темнохвойные леса (21 % площади зоны A) и верховые болота (30 %).

Зона рассеивания 3В	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
A	548,92	36,28	208,78	369,13	173,83	769,40	210,95	92,26	170,25	2579,79
	(21%)	(1%)	(8 %)	(14%)	(7%)	(30 %)	(8 %)	(4%)	(7%)	(100 %)
В	954,81	318,68	382,54	_	439,02	198,72	88,87	453,53	17,62	2853,79
	(33 %)	(11 %)	(13 %)		(15 %)	(7 %)	(3 %)	(16 %)	(1%)	(100 %)
C	23,64	103,23	77,77	84,41	15,87	13,43	66,10	115,69	15,31	515,45
	(5%)	(20 %)	(15 %)	(16 %)	(3 %)	(3 %)	(13 %)	(22 %)	(3%)	(100 %)
D	103,39	119,37	16,66	102,2	58,50	189,72	68,63	_	21,17	679,64
	(15%)	(18 %)	(2%)	(15 %)	(9 %)	(28 %)	(10 %)		(3%)	(100 %)
Е	245,01	_	157,21	136,95	149,80	93,91	73,84	35,72	1,08	893,51

Таблица 2. Площади типов растительного покрова в результате классификации KC Sentinel-2 (км²)

В зоне рассевания В наиболее распространены темнохвойные леса (1/3 общей площади зоны В), которые, так же как и в зоне А, имеют наибольшее воздействие аэрополлютантов. В зоне С возможен высокий риск деградации светлохвойных лесов (20 % территории) и заболоченных сосновых лесов низкого бонитета (рямов) (16 % площади зоны). В зоне рассеивания ЗВ от ФУ Герасимовского месторождения (зона D) наиболее распространены верховые открытые болота (28 %) и сосновые леса (18 %). В зоне Е неблагоприятному воздействию аэрополлютантов подвержены темнохвойные леса (27 % территории зоны Е). Таким образом, определены типы растительности и площади их распространения, установлена растительность, для которой высок риск деградации при воздушном рассеивании ЗВ и продуктов горения ПНГ.

(17%)

(11%)

(8%)

(4%)

 $(0,1\%) \mid (100\%)$

Заключение

В работе показано, что использование новых дистанционных данных перспективно и актуально для проведения мониторинговых наблюдений за состоянием окружающей природной среды Томской обл., особенно на территориях нефте- и газодобычи. Для анализа состояния оптических свойств атмосферы и аэрозоля применялись пассивные и активные спутниковые измерения на базе приборов MODIS и CALIPSO.

Для картографирования растительного покрова высокого разрешения адаптирована методика обработки КС Sentinel-2 с использованием программ ESA. Показано, что в зонах рассеивания A, B, E наибольшему риску деградации подвержены темнохвойные леса, занимающие 21, 33 и 27 % территорий зон соответственно. В зонах С и D наиболее важно проводить фитомониторинговые исследования за состоянием светлохвойных пород деревьев, занимающих 20 и 18 % площади зон соответственно.

Определены величины аэрозольной оптической толщины атмосферы в зонах действия факельных установок рассматриваемых месторождений на основе спутниковых оптических данных MOD04_3k. Проведён сравнительный анализ между значениями AOT над площадками с ФУ и близстоящими метеостанциями. Установлено, что в трёх из пяти случаев показатели AOT в районе расположения ФУ Двуреченского, Крапивинского, Лугинецкого, Шингинского и Южно-Черемшанского месторождений не превышают фоновые значения AOT. Приемлемое состояние атмосферы с незначительным антропогенным аэрозолем над ФУ этих месторождений связано с применением современных технологий по утилизации ПНГ AO «Томскнефть».

(27%)

(18%)

(15%)

На профиле лидара CALIOP в зоне рассеивания 3В от ФУ Васюганской группы месторождений зафиксирован дым на высоте от 30 м до 1 км. Здесь же зимой (12.02.2020) определены дым и пыль с высотой рассеивания от 3 до 10 км.

Приведённые исследования демонстрируют широкие возможности спутникового мониторинга состояний биосферы и атмосферы для выявления риска техногенного аэрозольного и теплового воздействия в условиях нефте- и газодобычи.

Работа выполнена в рамках государственного задания Института химии нефти СО РАН, финансируемого Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (НИОКТР 121031500048-1).

Литература

- 1. *Алексеева М. Н.*, *Ященко И. Г.* Алгоритм детектирования факельных установок по сжиганию попутного нефтяного газа и оценка объемов выбросов вредных веществ // Оптика атмосферы и океана. 2019. Т. 32. № 6. С. 490—494. http://dx.doi.org/10.15372/AOO20191106.
- 2. *Алексеева М. Н.*, *Рапута В. Ф.*, *Ярославцева Т. В.*, *Ященко И. Г.* Оценка атмосферного загрязнения при сжигании попутного газа по данным дистанционных наблюдений теплового излучения // Оптика атмосферы и океана. 2019. Т. 32. № 11. С. 915—919. DOI: 10.15372/AOO20191106.
- 3. *Бочка Л.А.*, *Кашницкий А.В.* Макет потоковой обработки данных Sentinel-2 // Вестн. Тверского гос. ун-та. Сер. «География и Геоэкология». 2018. № 3. С. 40—56. https://doi. org/10.26456/2226-7719-2018-3-40-56.
- 4. *Густокашин П. Е.*, *Катаев М. Ю*. Сравнительный анализ аэрозольной оптической толщи из спутниковых продуктов MODIS и CALIPSO уровня L2 // Управление, вычислительная техника и информатика. 2018. Т. 21. № 4. С. 70—74. DOI: 10.21293/1818-0442-2018-21-4-70-74.
- 5. *Маслов В. А.*, *Абдуллаев С. Ф.*, *Назаров Б. И.* Наблюдения быстрого осаждения аэрозоля по данным AERONET // Докл. Акад. наук Республики Таджикистан. 2018. Т. 61. № 2. С. 159-166.
- 6. Плахина И. Н., Панкратова Н. В., Махоткина Е. Л. Сравнение данных наземного и спутникового мониторинга аэрозольной оптической толщины атмосферы для территории России // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 2. С. 225—234. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-2-225-234.
- 7. *Полищук Ю. М.*, *Касаткин А. М.* Анализ биоиндикационных свойств сосны сибирской для оценки воздействия факельного сжигания попутного газа на природную среду // Вестн. Югорского гос. ун-та. 2006. Вып. 4. С. 87–92.
- 8. *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 // Проблемы анализа риска. 2011. Т. 8. № 4. С. 22—35.
- 9. *Рапута В.* Ф. Экспериментальные и численные исследования аэрозольных выпадений примесей в окрестности нефтегазового факела // Вестн. Новосибирского гос. ун-та. Сер. «Математика, механика, информатика». 2013. Т. 13. № 3. С. 96—102.
- 10. *Савичев О. Г.* Химический состав болотных вод на территории Томской области (Западная Сибирь) и их взаимодействие с минеральными и органоминеральными соединениями // Изв. Томского политех. ун-та. 2009. Т. 314. № 1. С. 72—77.
- 11. *Main-Knorn M.*, *Pflug B.*, *Louis J.*, *Debaecker V.*, *Müller-Wilm U.*, *Gascon F.* Sen2Cor for Sentinel-2 // Image and Signal Processing for Remote Sensing XXIII: Proc. SPIE. 2017. V. 10427. https://doi.org/10.1117/12.2278218.

Environmental satellite monitoring of the area under technogenic impact of oil and gas production in Tomsk Region

M. N. Alekseeva, I. G. Yashchenko

Institute of Petroleum Chemistry SB RAS, Tomsk 634055, Russia E-mail: amn@ipc.tsc.ru

The work deals with the environmental monitoring studies of the oil-producing areas of Tomsk Region using remote sensing data. The importance of this work is due to the problem of associated petroleum gas flaring in flare units (FUs). The paper presents the graphical and numerical data on pollution distribution by air during associated petroleum gas combustion as well as map data obtained using remote sensing methods, MOD04 products, Sentinel-2 data and CALIOP lidar images available on the internet. It is shown that dark coniferous forests occupying 21 % of the territories in the dispersion zones from the flares in the Vasyugan group of fields, 33 % in the Luginetsk group of fields, and 27 % in the Krapivinskoye and Dvurechenskoye fields are subject to highest degradation risk. The most vulnerable tree species in the zones of dispersion of pollutants from the flares of the Yuzhno-Cheremshanskoye and Gerasimovskoye oil fields are light coniferous forests occupying 20 and 18 % of the dispersion areas, respectively. The aerosol optical depth (AOD) values are given according to the MOD 04 3k optical data obtained directly above the flares. A comparative analysis between the AOD values measured over the sites with active flares and the neighboring meteorological stations shows that, in 3 cases out of 5, the AOD values do not exceed the background AOD data measured in the vicinity of the FUs in the Dvurechenskoye, Krapivinskoye, Luginetskoye, Shinginskoye, and Yuzhno-Cheremshanskoye fields. In the Olen'ye, Stolbovoye, and Pervomayskoye fields, excessive (compared to the background) AOD values were recorded in the air on all measurements dates. A satisfactory state of the atmosphere with an insignificant anthropogenic aerosol load over the FUs of some of the fields is due to the advanced APG utilization technologies used by OOO Tomskneft. The CALIOP lidar profile showed smoke and dust pollution recorded in the zone of pollution dispersion from the FUs of the Vasyugan group of fields (Stolbovoye and Katylginskoye). This study demonstrates the powerful capabilities of space-borne monitoring of the state of the biosphere and atmosphere for identifying the technogenic environmental risks of exposure to the aerosol or heat impact in oil and gas producing areas.

Keywords: oil and gas fields, Tomsk Region, associated petroleum gas, flare units, vegetation cover, Sentinel-2 satellite data, MOD04 products, CALIPSO lidar data

Accepted: 17.12.2021 DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-1-158-169

References

- 1. Alekseeva M. N., Yashchenko I. G., Algorithm for detection of gas flaring units and assessment of emissions, *Optika atmosfery i okeana*, 2019, Vol. 32, No. 6, pp. 490–494 (in Russian), http://dx.doi. org/10.15372/AOO20191106.
- 2. Alekseeva M. N., Raputa V. F., Yaroslavtseva T. V., Yashchenko I. G., Estimation of atmospheric pollution from gas flaring according to data of remote observations of flare thermal radiation, *Optika atmosfery i okeana*, 2019, Vol. 32, No. 11, pp. 915–919 (in Russian), DOI: 10.15372/AOO20191106.
- 3. Bochka L.A., Kashnitskiy A.V., The Layout of The Stream Data Processing Sentinel-2, *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. "Geografiya i Geoekologiya"*, 2018, No. 3, pp. 40–56 (in Russian), https://doi.org/10.26456/2226-7719-2018-3-40-56.
- 4. Gustokashin P. E., Kataev M. Yu., Comparative analysis of aerosol optical thickness from MODIS and CALIPSO L2 satellite products, *Upravlenie*, *vychislitel'naya tekhnika i informatika*, 2018, Vol. 21, No. 4, pp. 70–74 (in Russian), DOI: 10.21293/1818-0442-2018-21-4-70-74.
- 5. Maslov V.A., Abdullaev S.F., Nazarov B.I., Observations of Fast Aerosol Setting by Means AERONET Data, *Doklady Akademii nauk Respubliki Tadzhikistan*, 2018, Vol. 61, No. 2, pp. 159–166 (in Russian).
- 6. Plakhina I. N., Pankratova N.V., Makhotkina E. L., Comparison of ground and satellite monitoring of aerosol optical thickness of the atmosphere in Russia, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 2, pp. 225–234 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-2-225-234.
- 7. Polishchuk Yu. M., Kasatkin A. M., Analysis of the bioindication properties of Siberian pine to assess the impact of associated gas flaring on the natural environment, *Vestnik Yugorskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2006, Vyp. 4, pp. 87–92 (in Russian).

- 8. Polishchuk Yu. M., Kokorina N. V., Kochergin G. A., Peremitina T. O., Tokareva O. S., Methodology for assessing the environmental risk of the impact of point sources of atmospheric pollution based on bioindication data, *Problemy analiza riska*, 2011, Vol. 8, No. 4, pp. 22–35 (in Russian).
- 9. Raputa V. F., Experimental and numerical studies of aerosol fallout of impurities in the vicinity of an oil and gas torch, *Vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. "Matematika, mekhanika, informatika"*, 2013, Vol. 13, No. 3, pp. 96–102 (in Russian).
- 10. Savichev O.G., The chemical composition of bog waters on the territory of the Tomsk region (Western Siberia) and their interaction with mineral and organomineral compounds, *Izvestiya Tomskogo politekh-nicheskogo universiteta*, 2009, Vol. 314, No. 1, pp. 72–77 (in Russian).
- 11. Main-Knorn M., Pflug B., Louis J., Debaecker V., Müller-Wilm U., Gascon F., Sen2Cor for Sentinel-2, *Image and Signal Processing for Remote Sensing XXIII: Proc. SPIE*, 2017, Vol. 10427, https://doi.org/10.1117/12.2278218.