

## Дистанционная оценка качества атмосферного воздуха в пределах крупнейших месторождений нефти и газа России (2019–2023)

А. Э. Морозова, О. С. Сизов, М. А. Миронова

*РГУ нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина, Москва, 119991, Россия  
E-mails: Morozova-A.E@yandex.ru, kabanin@yandex.ru, mma.ecology@gmail.com*

Работа посвящена оценке качества атмосферного воздуха в пределах крупнейших месторождений нефти и газа Российской Федерации за 2019–2023 гг. Исходными данными исследования служат измерения TROPOMI (спутник Sentinel-5P) таких веществ, как оксид углерода, формальдегид, диоксид азота, диоксид серы и метан. Измерения получены с помощью облачной платформы Google Earth Engine для геопространственного анализа данных. В работе оцениваются модельные участки, охватывающие зоны максимальной концентрации месторождений нефти и газа. В экстенст участков включены крупные города (Сургут, Нижневартовск и др.), которые рассматриваются как неотъемлемая часть промышленного нефтегазового комплекса. В качестве фона для каждого участка приняты значения буферной зоны (20 км) вокруг общей внешней границы горных отводов соответствующих месторождений. Результаты оценки показали, что повышенные значения концентрации диоксида азота в наибольшей степени определяются влиянием добычи нефти и газа. Максимальное превышение на участках отводов относительно фона достигает 4,6–5 %, что связано с выбросами в крупных городах нефтегазовой специализации и на промышленных площадках месторождений. Относительно концентрации оксида углерода, формальдегида и метана данные TROPOMI не показывают заметного вклада нефтегазовой промышленности в загрязнение атмосферного воздуха. При этом выявленная особенность последовательного увеличения концентрации метана (на 2,8 % за 2019–2023 гг.) отражает глобальную тенденцию, определяемую ростом значений среднегодовой температуры воздуха. Явный вклад добычи нефти и газа в загрязнение воздуха диоксидом серы не прослеживается — локальное превышение концентрации в отдельные годы относительно фона (до 6,9–7,3 %) может быть связано с распространением дымовых шлейфов крупных лесных пожаров. Валидность полученных результатов подтверждается данными независимых наземных наблюдений в отношении концентрации диоксида азота и метана. Дистанционная оценка качества атмосферного воздуха может использоваться в качестве дополнения существующей системы производственного экологического мониторинга на месторождениях нефти и газа.

**Ключевые слова:** TROPOMI, Google Earth Engine, Sentinel-5P, загрязнение воздуха, добыча нефти и газа, парниковые газы, CH<sub>4</sub>, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, CO, HCHO

Одобрена к печати: 09.12.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-1-285-300

### Введение

На протяжении всего технологического цикла разработки нефтегазовых месторождений (от геологоразведки до сбыта углеводородов) наблюдаются негативные процессы, связанные с загрязнением атмосферного воздуха (Березняков и др., 2002; Дёмкина, Шулепова, 2024). Источники загрязнения находятся как на территории лицензионных участков, так и вдоль магистральных трубопроводов (Гарицкая и др., 2015; Ермилов и др., 2002). Кроме того, для обеспечения добычи формируется, как правило, сеть населённых пунктов нефтегазовой специализации (города, посёлки городского типа, вахтовые посёлки и др.), которые за счёт высокой концентрации промышленного производства также становятся значимым источником выбросов загрязняющих веществ (Морозова и др., 2023).

Выбросы могут происходить от локальных источников (факелы сжигания попутного нефтяного газа, дымовые трубы котельных, турбины насосов, выхлопные трубы автотранспорта и др.), которые обычно распределены на значительной территории, формируя общий негативный фон в региональном масштабе (Сулейманов и др., 2018). Несмотря на проведение

регулярных работ по производственному экологическому мониторингу на каждом месторождении, доступ к исходным данным о состоянии атмосферного воздуха практически отсутствует (Поршакова и др., 2014). В этой связи появляется актуальность внедрения дистанционных методов оценки качества воздуха в районах добычи нефти и газа, которые позволят провести объективный сравнительный анализ негативного влияния различных месторождений для дальнейших региональных обобщений.

Возможности дистанционных наблюдений за количественным и качественным составом атмосферы существенно расширились за последние два десятилетия. Одним из наиболее современных и доступных способов оперативного определения фактического уровня загрязняющих веществ в атмосфере в глобальном масштабе является использование данных спектрометра TROPOMI (англ. TROPOspheric Monitoring Instrument), установленного на спутнике Sentinel-5P (Veefkind et al., 2012).

Цель данной работы состоит в оценке уровня загрязнения атмосферного воздуха в пределах основных российских регионов добычи нефти и газа, расположенных в Республике Коми, Ямало-Ненецком автономном округе (ЯНАО), Ханты-Мансийском автономном округе (ХМАО), Республике Саха (Якутия) и Иркутской области, с 2019 по 2023 г.

### Территория и методы исследования

Основной объём нефти и газа в России добывается в Западной Сибири (ХМАО, ЯНАО, Тюменская область) — здесь находятся крупнейшие месторождения (Самотлорское, Уренгойское и др.), которые имеют длительную историю эксплуатации и развитую инфраструктуру. Важным ресурсным регионом также является северо-восточная часть Русской равнины, где более 50 лет ведётся разработка многочисленных средних и мелких месторождений (Усинское, Возейское и др.). Наряду с этим в последнее десятилетие идёт активное освоение месторождений в Восточной Сибири (Чаяндинское, Верхнечонское, Ковыктинское и др.).

В пределах каждого из указанных регионов было выбрано пять модельных участков, охватывающих зоны максимальной концентрации месторождений нефти и газа (рис. 1, табл. 1).

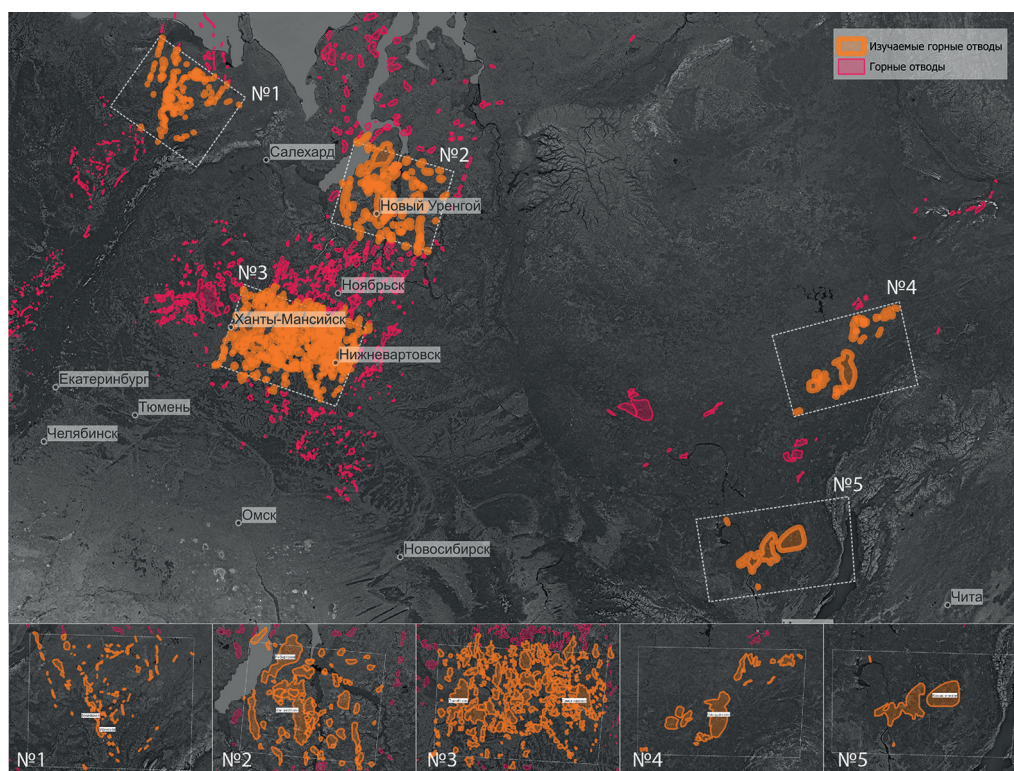


Рис. 1. Границы изучаемых участков

Таблица 1. Описание участков исследования

Участок (площадь, км <sup>2</sup> )	Субъект РФ	Город	Место-рождение, тип	Общая площадь, км <sup>2</sup>	Год начала эксплуатации	Полезное ископаемое	Компания	Ландшафт	Многолетняя мерзлота
№ 1 (Коми) (11 901,0)	Республика Коми, Ненецкий автономный округ	Усинск, Усть-Уса	Усинское, нефтяное	221,38	1973	Нефть, горючий газ	ООО «Лукойл-Коми»	Равнинные северо-таёжные восточноевропейские лесные ландшафты	Зона редкостного, островного и массивно-островного распространения многолетнемерзлых пород (ММП)
			Возейское, нефтяное	230,02	1977	Нефть, горючий газ, сера нефтяная, этан, пропан, бутан		Равнинные лесотундровые ландшафты, равнинные северо-таёжные восточноевропейские лесные ландшафты	
№ 2 (ЯНО) (11 927,8)	ЯНО	Пангоды, Новый Уренгой, Уренгой, Ямбург	Мелвежье, нефтегазо-конденсатное	2 111,05	1972	Нефть, горючий газ, конденсат, этан, пропан, бутан	ООО «Газпром добыча Нальм»	Равнинные тундровые ландшафты и равнинные лесотундровые ландшафты	Зона сплошного распространения ММП
			Ямбургское, нефтегазо-конденсатное	5 190,02	1986	Горючий газ, конденсат, нефть	ООО «Газпром добыча Ямбург»	Равнинные тундровые ландшафты	
			Уренгойское, нефтегазо-конденсатное	7 041,88	1978	Нефть, горючий газ, конденсат, этан, пропан, бутан	ООО «Газпром добыча Уренгой»		
№ 3 (ХМАО) (146 282,4)	ХМАО, Тюменская область	Ханты-Мансийск, Нефтеюганск, Пыть-Ях, Сургут, Фёдоровский, Лангеп, Покачи, Нижневартовск	Приобское, нефтяное	3 614,14	1988	Нефть, горючий газ, этан, пропан, бутан, сера нефтяная	ООО «РН-Юганскнефтегаз»/ООО «Газпром-нефть-Хантос»	Равнинные лесные ландшафты (средне-таёжные западносибирские), болотные ландшафты	Зона редкостного, островного и массивно-островного распространения ММП
			Самогортское, нефтяное	2 141,57	1969	Нефть, горючий газ, сера нефтяная, конденсат, этан, пропан, бутан	АО «Самогортнефтегаз»		

Окончание табл. 1

Участок (площадь, км <sup>2</sup> )	Субъект РФ	Город	Место-рождение, тип	Общая площадь, км <sup>2</sup>	Год начала эксплуатации	Полезное ископаемое	Компания	Ландшафт	Многолетняя мерзлота
№ 3 (ХМАО) (146 282,4)	ХМАО, Тюменская область	Ханты-Мансийск, Нефтеюганск, Пыть-Ях, Сургут, Фёдоровский, Лангелы, Покачи, Нижневартовск	Мамонтовское, нефтяное	727,05	1970	Нефть, горючий газ, этан, пропан, бутан, сера нефтяная	ООО «РН-Юганскнефтегаз»	Равнинные лесные ландшафты (среднетаёжные западносибирские), болотные ландшафты	Зона редкостного, островного и массивно-островного распространения ММП
			Салымская группа, нефтяные	2 792,96	1974	Нефть, горючий газ, сера, этан, пропан, бутан	ООО «Салым Петролеум Девелопмент», «РН-Юганскнефтегаз»		
			Тевлинское, Русскинское, нефтяное	1 721,29	1986	Нефть, горючий газ, этан, пропан, бутан, сера нефтяная	ООО «ЛУКОЙЛ-Западная Сибирь»		
№ 4 (Саха) (147 920,4)	Иркутская область, Республика Саха (Якутия)	Ленск, Витим	Чаяндинское, нефтегазоконденсатное	5 780,63	2019	Нефть, горючий газ, конденсат, сера нефтяная, этан, пропан, бутан, гелий	ООО «Газпром добыча Ноябрьск»	Равнинные лесные ландшафты (среднетаёжные восточносибирские)	Зона сплошного распространения ММП
			Верхнечонское, нефтегазоконденсатное	1 166,21	2008	Нефть, горючий газ, конденсат, гелий, этан, пропан, бутан	АО «Верхнечонскнефтегаз»		
№ 5 (Иркутск) (173 102,2)	Иркутская область	Братск, Северо-байкальский	Ковыктинское, газоконденсатное	6 381,74	2022	Горючий газ, конденсат, этан, пропан, бутан, гелий	ОАО «Газпром»	Среднегорные борельные ландшафты (пояс темнохвойной тайги и редколесий)	Зона редкостного, островного и массивно-островного распространения ММП

Примечание: Составлена по данным открытых источников:

- 1) ФГБУ «Росгеолфонд» (Единый..., 2021); 2) сайты профильных компаний.



В экстенд некоторых участков включены крупные города (Сургут, Нижневартовск и др.), которые рассматриваются как неотъемлемая часть промышленного нефтегазового комплекса. Загрязнение воздуха оценивалось в пределах площади горных отводов каждого участка. В качестве фона для отдельного выбранного участка приняты значения буферной зоны (20 км) вокруг общей внешней границы горных отводов соответствующих месторождений.

Таблица 2. Количество химических веществ, измеряемых ТРОПОМІ одновременно в пределах рассматриваемых экстендов

Год	Месяц											
	Янв.	Февр.	Март	Апр.	Май	Июнь	Июль	Авг.	Сент.	Окт.	Нояб.	Дек.
<i>Участок № 1 (Кочи)</i>												
2019	0	3	5	5	4	5	5	4	0	0	0	0
2020		0	4		5			5	5			
2021									3			
2022							4		4			
2023							5					
<i>Участок № 2 (ЯНАО)</i>												
2019	0	3	5	5	4	5	5	4	1	0	0	0
2020		0	3		5	5		5	4			
2021			4									
2022							4					
2023							5					
<i>Участок № 3 (ХМАО)</i>												
2019	0	0	5	5	5	4	5	5	3	0	0	0
2020			4				4		4			
2021							5					
2022						5	4		5			
2023					4	4	5		4			
<i>Участок № 4 (Саха)</i>												
2019	0	0	4	5	4	4	4	5	3	0	0	0
2020			2	4	5		5		4			
2021				5								
2022			4				4					
2023			2				5					
<i>Участок № 5 (Иркутск)</i>												
2019	0	0	5	5	4	4	4	5	4	0	0	0
2020			4	4	5		5		5			
2021				5								
2022					4		4					
2023					5		5					

Для оценки концентрации загрязняющих веществ в столбе атмосферного воздуха использовались данные спектрометра ТРОПОМІ, установленного на борту спутника Sentinel-5P (дата запуска: 13 октября 2017 г.) (Veefkind et al., 2012). Спектрометр ТРОПОМІ позволяет оценивать концентрацию аэрозолей, озона ( $O_3$ , моль/ $m^2$ ), диоксида серы ( $SO_2$ ,

моль/м<sup>2</sup>), диоксида азота (NO<sub>2</sub>, моль/м<sup>2</sup>), метана (CH<sub>4</sub>, млрд<sup>-1</sup>), формальдегида (НСНО, моль/м<sup>2</sup>) и оксида углерода (СО, моль/м<sup>2</sup>). Полный архив данных доступен с 08.02.2019 по настоящее время. Данные распространяются на бесплатной основе через различные геопорталы экосистемы космических данных Copernicus (*англ.* Copernicus Data Space Ecosystem — CDSE), а также через облачную платформу GEE (*англ.* Google Earth Engine) (Apicella et al., 2022; Gorelick et al., 2017).

В рамках текущей работы получение данных TROPOMI и основные аналитические операции с ними осуществлялись с помощью API (*англ.* Application Programming Interface) платформы GEE. Данные TROPOMI в GEE представлены в виде тематических наборов (коллекций), соответствующих отдельным химическим соединениям (<https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/sentinel-5p>). В итоговых наборах используется порог качества 75 % для NO<sub>2</sub> и 50 % для всех остальных веществ. Кроме этого, проведена замена отрицательных значений SO<sub>2</sub> на 0 (отрицательные значения могут возникать при ясном небе или низком уровне загрязняющих веществ относительно используемого порога). Операции пространственного анализа выполнялись непосредственно в самой платформе GEE с помощью встроенного редактора кода (*англ.* Code Editor) — выборка, фильтрация, расчёт зональной статистики (среднее, максимум, минимум и др.), выгрузка табличных данных для дальнейшего изучения. Расчёт итоговой статистики проводился в программе MS Excel 16.82, тематические карты оформлялись в QGIS v.3.34.

Для анализа загрязнения выбраны пять химических соединений — CH<sub>4</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, НСНО, СО, период мониторинга 2019–2023 гг.

Подготовительный этап исследования включал оценку доступности исходных данных по критерию доступности наблюдений (не менее трёх измерений в месяц). Результат оценки доступности показал, что критерий доступности для всех рассматриваемых участков реализуется только с марта по сентябрь (*табл.* 2). В остальное время сказываются недостаток солнечного освещения (ноябрь, декабрь) и условия облачности (январь, февраль). Данные по метану с 26 июля по 31 августа 2022 г. отсутствуют из-за сбоя в работе провайдера ([https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/COPERNICUS\\_S5P\\_OFFL\\_L3\\_CH4#description](https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/COPERNICUS_S5P_OFFL_L3_CH4#description)).

В массиве полученных измерений дополнительно проведена фильтрация аномально высоких значений SO<sub>2</sub>, СО, НСНО, связанных с дымовыми шлейфами от крупных лесных пожаров в летнее время (наличие пожаров и дымовых шлейфов проверялось как визуально по ежедневным данным MODIS, так и статистически по значениям FRP (*англ.* Fire Radiative Power) тепловых аномалий FIRMS (*англ.* Fire Information for Resource Management System) (Giglio et al., 2021)).

## Результаты исследования

Для выявления негативного воздействия добычи нефти и газа на качество атмосферного воздуха на первом этапе исследования проведено сравнение с фоновыми значениями. Полученные результаты показали следующее (*табл.* 3–5):

- концентрация *оксида углерода* (СО) в пределах горных отводов сопоставима со значениями фона. При этом фоновое содержание СО в среднем на 1 % больше, чем на месторождениях — наибольшее превышение фона (на 2,3 %) фиксируется на участке № 2 (ЯНАО). Только на участке № 1 (Коми) регистрируются превышения значений горных отводов на 2 %;
- концентрация *формальдегида* (НСНО) в пределах горных отводов в среднем идентична фоновым значениям. На участках № 1 (Коми) и № 4 (Саха) зафиксировано превышение значений горных отводов на 2,2 и 1,8 %, в то время как на участках № 2 (ЯНАО), № 3 (ХМАО) и № 5 (Иркутск) фон несколько уступает — на 0,6, 1,4 и 2 % соответственно;
- концентрация *метана* (CH<sub>4</sub>) в пределах горных отводов в среднем на 0,1 % выше фоновых. Максимальная разница отмечается на Чайнинском месторождении (0,2 %);

- концентрация *диоксида азота* ( $\text{NO}_2$ ) в пределах горных отводов заметно превышает фоновые значения (в среднем на 2,2 %). Тенденция наблюдается для всех участков, за исключением участка № 5 (Иркутск), где фон оказался грязнее на 3,5 % (причины этой особенности рассматриваются ниже в разделе «Обсуждение результатов»);
- концентрация *диоксида серы* ( $\text{SO}_2$ ) в пределах горных отводов и фона в среднем не отличается (разница составляет порядка 0,34 %), на что явно оказывает влияние участок № 5 (Иркутск) — здесь воздух фона существенно грязнее отводов (на 17,7 %). Для остальных участков среднее превышение отводов достигает 4,85 %, что позволяет говорить о возможном влиянии добычи нефти и газа.

Таблица 3. Отношение концентрации загрязняющих веществ в границах месторождений к фоновому содержанию

Модельный участок	Химические вещества, %				
	$\text{CH}_4$	CO	НСНО	$\text{NO}_2$	$\text{SO}_2$
№ 1 (Коми)	0	2,0	2,2	1,6	6,9
№ 2 (ЯНАО)	0,1	-2,3	-0,6	4,6	0,9
№ 3 (ХМАО)	0,1	-1,9	-1,4	5,0	4,3
№ 4 (Саха)	0,2	-0,9	1,8	2,9	7,3
№ 5 (Иркутск)	0,1	-1,4	-2,0	-3,1	-17,7

Таблица 4. Среднее содержание химических веществ за 2019–2023 гг. в столбе тропосферы в пределах месторождений

Модельный участок	Химические вещества				
	$\text{CH}_4$ , млрд <sup>-1</sup>	CO, моль/м <sup>2</sup>	НСНО, моль/м <sup>2</sup>	$\text{NO}_2$ , моль/м <sup>2</sup>	$\text{SO}_2$ , моль/м <sup>2</sup>
№ 1 (Коми)	1842,8	0,031	$3,89 \cdot 10^{-5}$	$7,75 \cdot 10^{-6}$	$6,95 \cdot 10^{-5}$
№ 2 (ЯНАО)	1849,6	0,032	$3,77 \cdot 10^{-5}$	$7,30 \cdot 10^{-6}$	$6,14 \cdot 10^{-5}$
№ 3 (ХМАО)	1843,8	0,032	$5,96 \cdot 10^{-5}$	$1,06 \cdot 10^{-6}$	$7,56 \cdot 10^{-5}$
№ 4 (Саха)	1836,9	0,033	$6,51 \cdot 10^{-5}$	$6,83 \cdot 10^{-6}$	$5,04 \cdot 10^{-5}$
№ 5 (Иркутск)	1822,6	0,031	$5,66 \cdot 10^{-5}$	$7,32 \cdot 10^{-6}$	$9,08 \cdot 10^{-5}$

Таблица 5. Среднее содержание веществ за 2019–2023 гг. в столбе тропосферы в пределах фоновых участков

Модельный участок	Химические вещества				
	$\text{CH}_4$ , млрд <sup>-1</sup>	CO, моль/м <sup>2</sup>	НСНО, моль/м <sup>2</sup>	$\text{NO}_2$ , моль/м <sup>2</sup>	$\text{SO}_2$ , моль/м <sup>2</sup>
№ 1 (Коми)	1842,1	0,032	$3,97 \cdot 10^{-5}$	$7,63 \cdot 10^{-6}$	$6,51 \cdot 10^{-5}$
№ 2 (ЯНАО)	1848,5	0,032	$3,79 \cdot 10^{-5}$	$6,98 \cdot 10^{-6}$	$6,05 \cdot 10^{-5}$
№ 3 (ХМАО)	1841,5	0,033	$6,04 \cdot 10^{-5}$	$1,01 \cdot 10^{-5}$	$7,16 \cdot 10^{-5}$
№ 4 (Саха)	1834,1	0,034	$6,42 \cdot 10^{-5}$	$6,64 \cdot 10^{-6}$	$4,61 \cdot 10^{-5}$
№ 5 (Иркутск)	1820,6	0,031	$5,77 \cdot 10^{-5}$	$7,55 \cdot 10^{-6}$	$1,09 \cdot 10^{-4}$

## Обсуждение результатов

1. **Оксид углерода (CO) и формальдегид (НСНО).** Отсутствие значимых различий между значениями в пределах горных отводов и фоном подтверждается отсутствием явных пространственных закономерностей распределения зон повышенной концентрации. Увеличенную

концентрацию CO, наблюдаемую в отдельные месяцы, можно связать с масштабными выбросами углерода во время природных лесных пожаров. В частности, пик выбросов CO зафиксирован в июле 2019 г. на Чайандинском месторождении, при этом количество термоточек (по данным FIRMS) в это время составило 16 142 (для сравнения в июне зафиксировано 1125 термоточек, а в августе — 9247). Аналогичная ситуация выявлена для пика выбросов CO в июле 2021 г. — количество термоточек в этот месяц составило 5327, в июне — 2302, в августе — 3504. В целом можно сделать вывод, что по оксиду углерода и формальдегиду дистанционные средства мониторинга не показывают сколько-нибудь заметного вклада нефтегазовой промышленности в загрязнение атмосферного воздуха.

**2. Метан (CH<sub>4</sub>).** При практически полном отсутствии количественных различий между территорией месторождений и фоновыми участками, пространственное распределение зон повышенной концентрации метана свидетельствует о доминирующей роли естественных источников эмиссии, таких как водно-болотные угодья. В качестве наглядного примера приведены карты распределения метана для участков № 1 и 3, которые довольно однозначно соотносятся с участками речных долин и обширных болотных массивов (рис. 2).

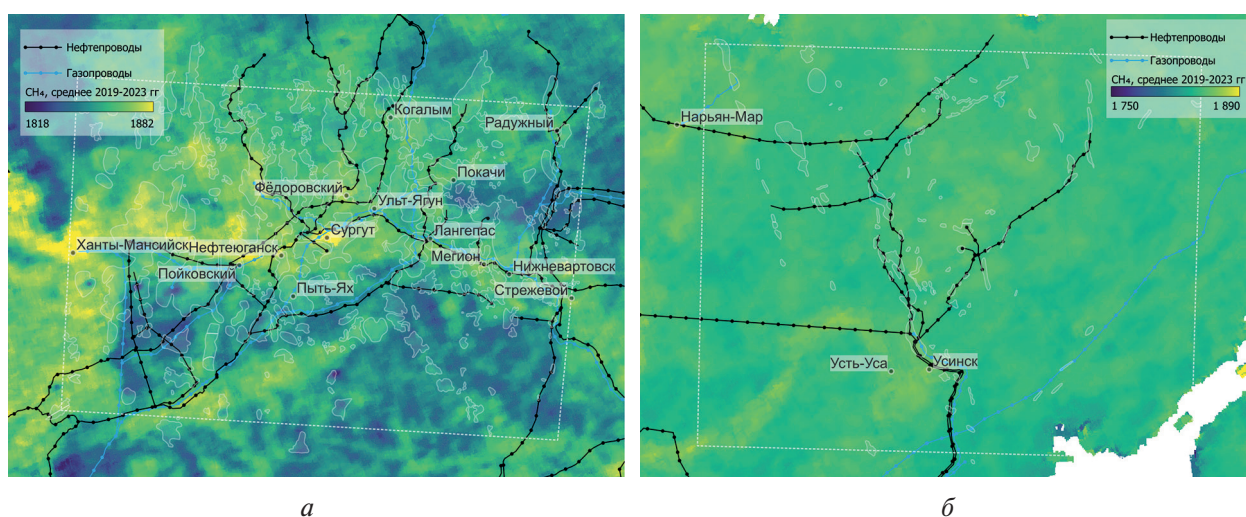


Рис. 2. Среднее пространственное распределение CH<sub>4</sub> (в млрд<sup>-1</sup>) за 2019–2023 гг. на участках: а — № 1 (Коми); б — № 3 (ХМАО)

Поступающий в атмосферу метан имеет, по всей видимости, биогенное происхождение (Sabrekov et al., 2023), а тенденция роста среднегодовых значений может определяться повышением среднегодовой температуры воздуха, сопровождаемым увеличением скорости биогеохимических процессов (Адушкин, Кудрявцев, 2018). В среднем за время наблюдений (2019–2023) рост содержания метана в пределах рассматриваемых участков составил 49 млрд<sup>-1</sup> (2,64 %) (рис. 3, см. с. 293). Подобная тенденция соответствует результатам наземных измерений на арктических станциях Росгидромета (Тикси, Териберка, Новый Порт) (рис. 4, см. с. 293) — для Териберки прирост составил 61,3 млрд<sup>-1</sup> или 3 % (Обзор..., 2024), а также данным со станции Барроу (Аляска, США), где отмечен рост на 56,7 млрд<sup>-1</sup> или 2,8 % (Thoning et al., 2024). В целом в обобщающих климатических отчётах отмечается тенденция увеличения концентрации метана в глобальном масштабе (Обзор..., 2024; Strippa et al., 2023; Feng et al., 2023; Mousavi et al., 2024; O'Neill, 2022; Xu et al., 2021). В этом плане одним из перспективных направлений развития данного исследования можно рассматривать регулярный дистанционный мониторинг Арктической зоны России (в том числе регионов активного антропогенного воздействия) с целью выявления региональных особенностей эмиссии метана по отношению к глобальным климатическим изменениям. В качестве примеров пионерных работ по этой тематике можно привести публикации (Богоявленский и др., 2020, 2022).



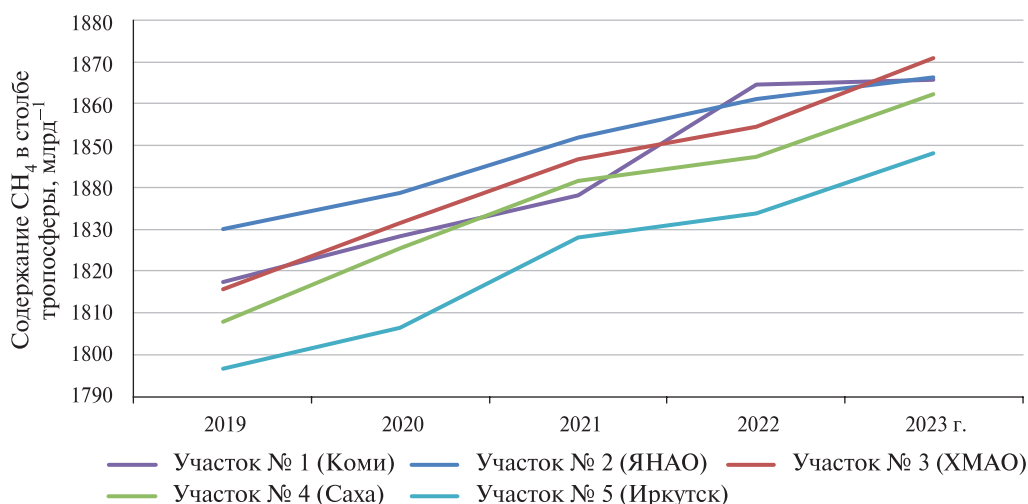


Рис. 3. Среднее содержание CH<sub>4</sub> (в млрд<sup>-1</sup>) в столбе тропосферы за 2019–2023 гг.

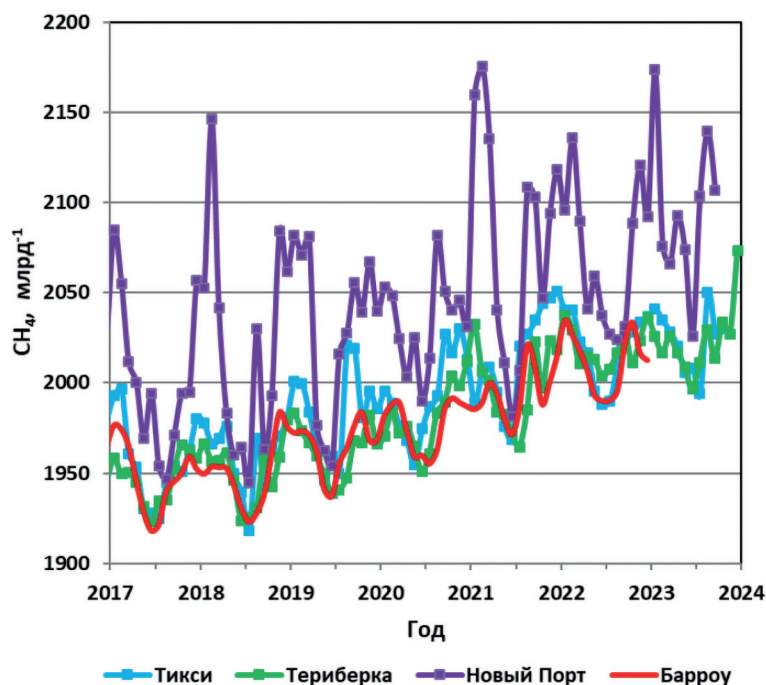


Рис. 4. Динамика концентрации метана по данным российских арктических станций (Обзор..., 2024) в сравнении с измерениями на станции Барроу

3. **Диоксид азота (NO<sub>2</sub>).** Практически на всех участках концентрация NO<sub>2</sub> в пределах горных отводов превышает значения фона (в среднем на 3,53 %). Анализ пространственного распределения источников загрязнения позволяет сделать несколько предположений:

- наибольший вклад в загрязнение вносят крупные города нефтегазовой специализации (Новый Уренгой, Сургут, Нижневартовск, Ханты-Мансийск и др.) (рис. 5, см. с. 294). Эмиссия связана с деятельностью городских ТЭЦ, государственных районных электростанций (ГРЭС), автотранспорта (Lorente et al., 2019; Morozova et al., 2023). Кроме того, территория муниципалитетов нередко пересекается с лицензионными участками. В этом отношении города следует рассматривать в качестве опорной промышленной базы для осуществления добычи на окружающих месторождениях. Другими словами, уровень загрязнения в подобных городах напрямую зависит от уровня добычи и интенсивности хозяйственной деятельности;

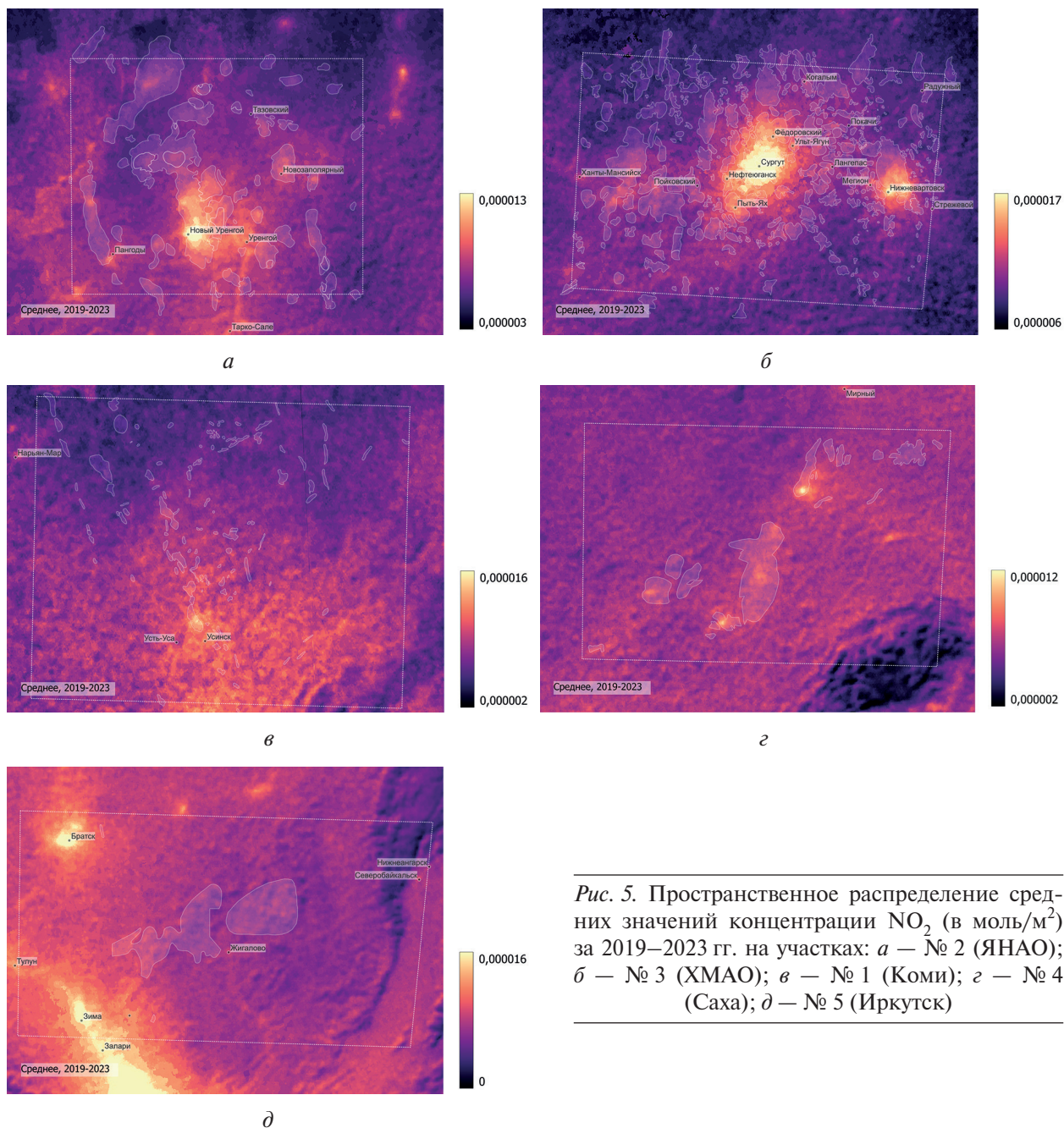


Рис. 5. Пространственное распределение средних значений концентрации  $\text{NO}_2$  (в моль/ $\text{м}^2$ ) за 2019–2023 гг. на участках: а – № 2 (ЯНАО); б – № 3 (ХМАО); в – № 1 (Коми); г – № 4 (Саха); д – № 5 (Иркутск)

- на месторождениях с отсутствием крупных городов (участок № 1) и для вновь осваиваемых месторождений (участок № 4) пространственное положение очагов загрязнения совпадает с центральными промышленными площадками, где концентрируются объекты инфраструктуры (цеха добычи нефти и газа, цеха подготовки и перекачки нефти, дожимные насосные станции, нефтеперекачивающие станции и др.). Абсолютные значения при этом существенно ниже, чем в нефтегазовых городах, что можно связать с низкой численностью персонала на промыслах по сравнению с численностью городских жителей;
- повышенные значения на участке № 5 (Иркутск) определяются промышленным вкладом близлежащих металлургических и целлюлозно-бумажных заводов (Братск, Вихоревка, Зима, Свирск, Тулун, Усолье-Сибирское, Черемхово, Шелехов) (Ахтиманина, 2013; Битюкова и др., 2024; Ефимова и др., 2019; Обзор..., 2024). Подобное соседство демонстрирует относительно низкие выбросы  $\text{NO}_2$  при добыче нефти и газа по сравнению с предприятиями цветной металлургии.

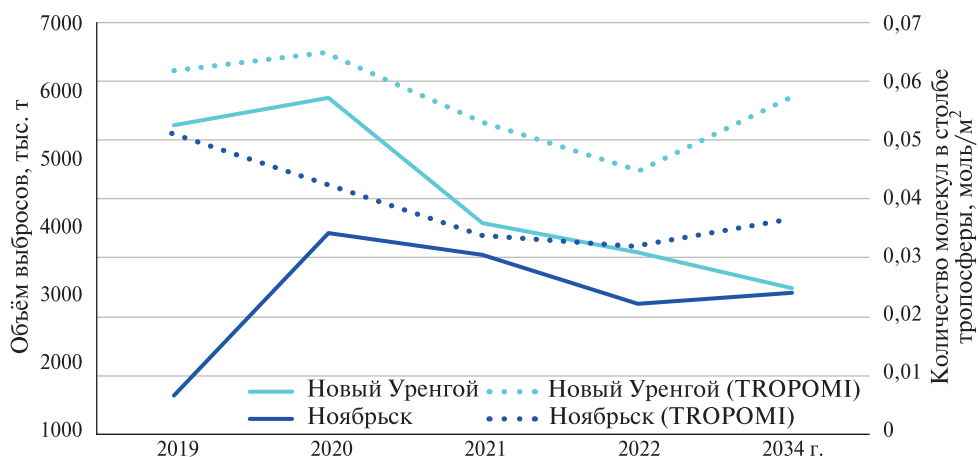


Рис. 6. Среднее содержание  $\text{NO}_2$  за 2019–2023 гг. в границах городских округов по государственным отчётам (форма «2-ТП воздух») и данным TROPOMI

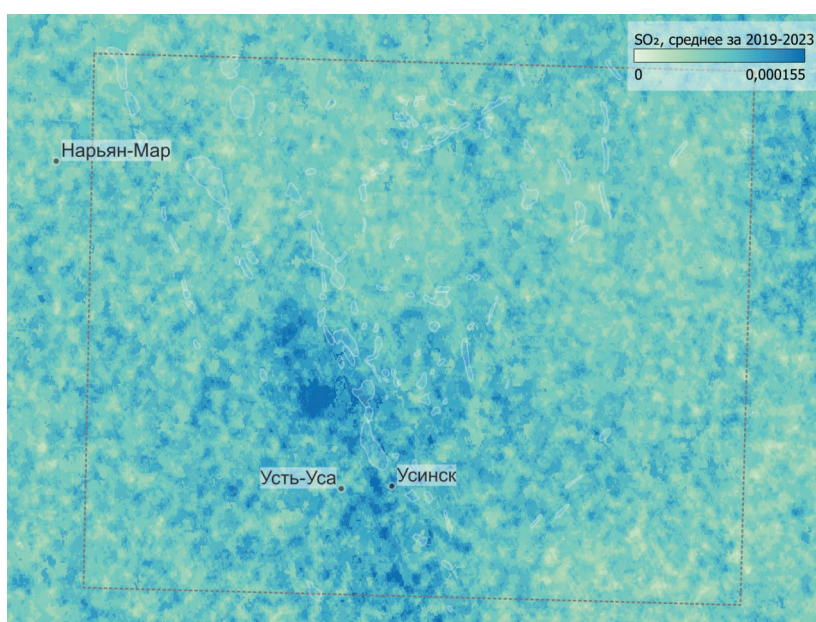


Рис. 7. Среднее пространственное распределение  $\text{SO}_2$  (в моль/м<sup>2</sup>) за 2019–2023 гг. на участке № 1 (Коми)

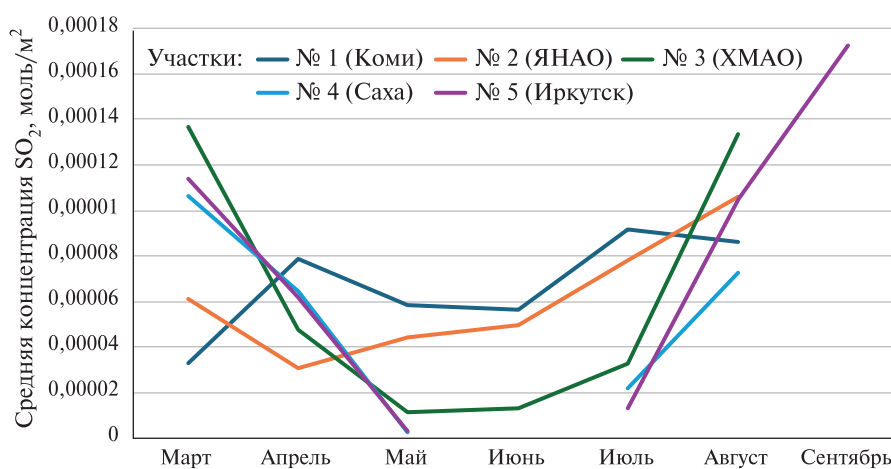


Рис. 8. Усреднённая динамика концентрации  $\text{SO}_2$  в течение года за 2019–2023 гг. (для участков № 4 и № 5 уровень  $\text{SO}_2$  за июнь ниже используемого порога)



В качестве наземной валидации можно привести результаты сравнения дистанционных данных TROPOMI и государственных отчётов по форме «2-ТП воздух» в г. Ноябрьске и Новом Уренгое (<https://rpn.gov.ru/open-service/analytic-data/statistic-reports/air-protect/>). На *рис. 6* (см. с. 295) прослеживается явная сходимость относительных изменений от года к году, что косвенно свидетельствует о достоверности результатов дистанционного мониторинга, даже с учётом имеющихся физических ограничений по критерию доступности. При этом в силу различий методик и возможностей дистанционных и наземных наблюдений можно сделать вывод о необходимости их комплексного применения, например, в рамках реализации новой федеральной государственной информационной системы (ФГИС) состояния окружающей среды (Постановление..., 2024).

**4. Диоксид серы (SO<sub>2</sub>).** Концентрация SO<sub>2</sub> в пределах границ горных отводов также практически на всех участках превышает фоновые значения (в среднем на 4,85%). Пространственное распределение источников эмиссии показывает, что основной вклад, по всей видимости, вносят факельные установки сжигания попутного нефтяного газа (*рис. 7*, см. с. 295). Кроме того, повышенные значения в отдельные годы можно связать с дымовыми шлейфами от лесных пожаров. Об этом, в частности, свидетельствует рост концентрации в августе и, отчасти, в сентябре (*рис. 8*, см. с. 295). Превышения фона на участке № 5 (Иркутск), как и в случае с NO<sub>2</sub>, связаны с деятельностью металлургических предприятий в агломерациях Братска и Иркутска. Таким образом, выделить явный существенный вклад добычи нефти и газа в загрязнение воздуха SO<sub>2</sub> на основе дистанционных наблюдений не представляется возможным.

## Заключение

Проведённое исследование позволяет сделать следующие выводы.

Анализ концентрации оксида углерода (CO), формальдегида (HCHO) и метана (CH<sub>4</sub>) по дистанционным данным TROPOMI не показывает заметного вклада нефтегазовой промышленности в загрязнение атмосферного воздуха.

Выявленная особенность последовательного роста концентрации метана CH<sub>4</sub> (на 2,64 % за 2019–2023 гг.) отражает глобальную тенденцию, определяемую ростом среднегодовой температуры воздуха и сопровождаемую увеличением скорости разложения органического вещества в пределах водно-болотных угодий (широких речных долин и обширных болотных массивов).

Основное негативное влияние добычи нефти и газа на качество атмосферного воздуха выявлено на примере диоксида азота (NO<sub>2</sub>). Основными источниками выбросов на участках горных отводов являются крупные города нефтегазовой специализации и крупные узловые промышленные площадки на промыслах (цеха добычи нефти и газа, цеха подготовки и перекачки нефти, дожимные насосные станции, нефтеперекачивающие станции). Максимальные превышения относительно фона достигают 4,6–5 %.

Явного воздействия добычи нефти и газа на загрязнение воздуха диоксидом серы (SO<sub>2</sub>) на основе дистанционных наблюдений не прослеживается, единичные повышения в отдельные годы относительно фона (до 6,9–7,3 %) могут быть связаны с распространением дымовых шлейфов крупных лесных пожаров.

Влияние добычи нефти и газа на загрязнение воздуха диоксидом азота (NO<sub>2</sub>) и диоксидом серы (SO<sub>2</sub>) заметно ниже воздействия предприятий металлургической промышленности (на 3,1 и 17,7 % соответственно).

Валидность полученных результатов в отношении концентрации метана (CH<sub>4</sub>) и диоксида азота (NO<sub>2</sub>) подтверждается данными наземных наблюдений.

В целом спектрометр TROPOMI является перспективным инструментом для оценки качества атмосферного воздуха в пределах месторождений нефти и газа. Дистанционные методы могут использоваться как дополнение существующей системы производственного экологического мониторинга, однако при практической деятельности необходимо учиты-



вать доступность исходных данных в связи с физическими ограничениями дистанционных наблюдений (условия освещённости и наличие облачного покрова).

## Литература

1. Адушкин В. В., Кудрявцев В. П. Об эмиссии метана в Арктическом регионе // Актуальные проблемы нефти и газа. 2018. № 4(23). С. 1–9. DOI: 10.29222/ipng.2078-5712.2018-23.art64.
2. Ахтиманкина А. В. Загрязнение атмосферного воздуха выбросами промышленных предприятий Иркутской области // Изв. Иркутского гос. ун-та. Сер.: Науки о Земле. 2013. Т. 1. С. 3–19.
3. Березняков А. И., Смолов Г. К., Попов А. П., Осокин А. Б., Грива Г. И., Галактионов Э. Ю. Комплексный мониторинг природно-технических систем как технология управления надежностью инженерных сооружений // Проблемы экологии в газовой промышленности: научно-техн. сб. № 3. М.: ИРЦ Газпром, 2002. С. 19–31.
4. Битюкова В. Р., Дехнич В. С., Кравчик А. И., Касимов Н. С. Оценка влияния автономных систем отопления жилых строений на загрязнение воздуха в муниципальных образованиях (на примере Байкальского региона) // Вестн. Московского ун-та. Сер. 5. География. 2024. № 1. С. 22–36. <https://doi.org/10.55959/MSU0579-9414.5.79.1.2>.
5. Богоявленский В. И., Сизов О. С., Никонов Р. А. и др. Дегазация Земли в Арктике: генезис природной и антропогенной эмиссии метана // Арктика: экология и экономика. 2020. № 3(39). С. 6–22. DOI: 10.25283/2223-4594-2020-3-6-22.
6. Богоявленский В. И., Сизов О. С., Никонов Р. А., Богоявленский И. В. Мониторинг изменений концентрации метана в атмосфере Арктики в 2019–2021 годах по данным спектрометра TROPOMI // Арктика: экология и экономика. 2022. Т. 12. № 3. С. 304–319. DOI: 10.25283/2223-4594-2020-3-304-319.
7. Гарицкая М. Ю., Байтелова А. И., Алеева О. Н., Чернышева К. С. Оценка экологического состояния территории, прилегающей к Ольховскому месторождению // Карельский науч. журн. 2015. № 3 (12). С. 91–94.
8. Дёмкина А. Р., Шулепова О. В. Матричный метод интегральной оценки воздействия на окружающую среду Ковыктинского газоконденсатного месторождения // АПК: инновационные технологии. 2024. № 2. С. 52–62.
9. Единый фонд геологической информации о недрах. Реестр первичной и интерпретированной информации. 2021. <https://efgi.ru/>.
10. Ермилов О. М., Грива Г. И., Москвин В. И. Воздействие объектов газовой промышленности на северные экосистемы и экологическая стабильность геотехнических комплексов в криолитозоне. Новосибирск: Изд-во СО РАН. 2002. 148 с.
11. Ефимова Н. В., Мыльникова И. В., Кузьмина М. В. и др. Оценка канцерогенного риска для населения экологически неблагоприятных территорий Иркутской области // Медицина труда и промышленная экология. 2019. № 2. С. 117–121. <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2019-2-117-121>.
12. Морозова А. Э., Сизов О. С., Миронова М. А., Лобжанидзе Н. Е. Дистанционная оценка качества атмосферного воздуха в населенных пунктах нефтегазовой специализации Ямало-Ненецкого автономного округа // Геодезия и картография. 2023. № 11. С. 31–42. DOI: 10.22389/0016-7126-2023-1001-11-31-42.
13. Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2023 год. М.: Росгидромет, 2024. 215 с. [https://www.meteorf.gov.ru/upload/iblock/42b/Обзор%202023\\_010724.pdf](https://www.meteorf.gov.ru/upload/iblock/42b/Обзор%202023_010724.pdf).
14. Поршакова А. Н., Старостин С. В., Котельников Г. А. Экологический мониторинг районов нефтяных и газовых месторождений: проблемы и перспективы // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 3.
15. Постановление Правительства РФ от 19.03.2024 № 329 «О федеральной государственной информационной системе состояния окружающей среды». 2024.
16. Сулейманов Р. А., Бактыбаева З. Б., Валеев Т. К. и др. Эколого-гигиеническая характеристика окружающей среды и состояние здоровья населения на территориях добычи и транспорта нефти // Ульяновский медико-биолог. журн. 2018. № 4. С. 124–142. DOI: 10.23648/UMBJ.2018.32.22703.
17. Apicella L., De Martino M., Quarati A. Copernicus User Uptake: From data to applications // ISPRS Intern. J. Geo-Information. 2022. V. 11. No. 2. Article 121. 34 p. DOI: 10.3390/ijgi11020121.
18. Crippa M., Guizzardi D., Pagani F. et al. GHG emissions of all world countries. Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2023. DOI: 10.2760/953322.
19. Feng L., Palmer P. I., Parker R. J. et al. Methane emissions are predominantly responsible for record-breaking atmospheric methane growth rates in 2020 and 2021 // Atmospheric Chemistry and Physics (ACP). 2023. V. 23. No. 8. P. 4863–4880. <https://doi.org/10.5194/acp-23-4863-2023>.

20. Giglio L., Schroeder W., Hall J. V., Justice C. O. MODIS Collection 6 and Collection 6.1. Active Fire Product User's Guide. NASA, Washington DC, USA, 2021. 64 p.
21. Gorelick N., Hancher M., Dixon M. et al. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone // *Remote Sensing of Environment*. 2017. V. 202. P. 18–27. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>.
22. Lorente A., Boersma K., Eskes H. et al. Quantification of nitrogen oxides emissions from build-up of pollution over Paris with TROPOMI // *Scientific Reports*. 2019. V. 9. Article 20033. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-56428-5>.
23. Morozova A., Sizov O., Elagin P. et al. Evaluation of the impact of COVID-19 restrictions on air pollution in Russia's largest cities // *Atmosphere*. 2023. V. 14. No. 6. Article 975. 20 p. <https://doi.org/10.3390/atmos14060975>.
24. Mousavi S. M., Dinan N. M., Ansarifard S. et al. Unveiling the drivers of atmospheric methane variability in Iran: A 20-year exploration using spatiotemporal modeling and machine learning // *Environmental Challenges*. 2024. V. 15. Article 100946. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2024.100946>.
25. O'Neill S. Climate change action alights on satellite detection of methane // *Engineering*. 2022. V. 16. P. 9–12. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2022.07.003>.
26. Sabrekov A. F., Terentjeva I. E., McDermid G. J. et al. Methane in West Siberia terrestrial seeps: Origin, transport, and metabolic pathways of production // *Global Change Biology*. 2023. V. 29. No. 18. P. 5334–5351. DOI: 10.1111/gcb.16863.
27. Thoning K. W., Lan X., Crotwell A. M., Mund J. W. Atmospheric methane from quasi-continuous measurements at Barrow, Alaska and Mauna Loa, Hawaii, 1986–present. Version: 2024-08-15. National Oceanic and Atmospheric Administration, Global Monitoring Laboratory, Boulder, Colorado, USA, 2024. <https://doi.org/10.15138/ve0c-be70>.
28. Veefkind J. P., Aben I., McMullan K. et al. TROPOMI on the ESA Sentinel-5 Precursor: A GMES mission for global observations of the atmospheric composition for climate, air quality and ozone layer applications // *Remote Sensing of Environment*. 2012. V. 120. P. 70–83. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.09.027>.
29. Xu J., Liu Q., Wang K. et al. Spatiotemporal variation in near-surface CH<sub>4</sub> concentrations in China over the last two decades // *Environmental Science and Pollution Research*. 2021. V. 28. P. 47239–47250. DOI: 10.1007/s11356-021-14007-0.

## **Remote assessment of atmospheric air quality within Russia's largest oil and gas fields (2019–2023)**

**A. E. Morozova, O. S. Sizov, M. A. Mironova**

*Gubkin University, Moscow 119991, Russia*

*E-mails: Morozova-A.E@yandex.ru, kabanin@yandex.ru, mma.ecology@gmail.com*

The paper is devoted to the assessment of the atmospheric air quality within the largest oil and gas fields of the Russian Federation for the period 2019–2023. The initial data of the study are TROPOMI measurements (Sentinel-5P satellite) of such gases as carbon monoxide, formaldehyde, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and methane. The measurements were obtained using the Google Earth Engine cloud platform for geospatial analysis of air pollution data within five selected model areas covering the zones of maximum concentration of oil and gas fields. The extent of the areas includes large cities (Surgut, Nizhnevartovsk, etc.), which are considered an integral part of the industrial oil and gas complex. The values of the buffer zone (20 km) around the common outer boundary of mining allotments of the corresponding fields were taken as a reference for each section. The assessment results showed that nitrogen dioxide is the most representative component for remote analysis within the oil and gas fields. Maximum excesses within the allotments relative to the background reach 4.6–5 %, which is associated with emissions in large cities specializing in oil and gas and at industrial sites of fields. Regarding the concentrations of carbon monoxide, formaldehyde, and methane, TROPOMI data do not indicate a noticeable contribution of the oil and gas industry to air pollution. At the same time, the identified feature of a consistent increase in methane concentrations (by an average of 2.8 % for 2019–2023) reflects a global trend determined by an increase in average annual air temperatures. There is no clear contribution of oil and gas production to air pollution with sulfur dioxide — local excesses of concentrations in certain years relative to the background (up to 6.9–7.3 %) may be associated with the spread of smoke plumes from large forest fires. The validity of the obtained results is confirmed

by ground-based observations of nitrogen dioxide and methane concentrations. Remote assessment of atmospheric air quality can be used as a supplement to the existing system of industrial environmental monitoring at oil and gas fields.

**Keywords:** TROPOMI, Google Earth Engine, Sentinel-5P, air pollution, oil and gas production, greenhouse gases, CH<sub>4</sub>, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, CO, HCHO

Accepted: 09.12.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-1-285-300

## References

1. Adushkin V.V., Kudryavtsev V.P., On methane emissions in the Arctic Region, *Actual Problems of Oil and Gas*, 2018, No. 4 (23), pp. 1–9 (in Russian), DOI: 10.29222/ipng.2078-5712.2018-23.art64.
2. Akhtimankina A.V., Air pollution by industrial emissions of the Irkutsk region, *Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser.: Earth Sciences*, 2013, V. 1, pp. 3–19 (in Russian).
3. Bereznyakov A.I., Smolov G.K., Popov A.P., Osokin A.B., Griva G.I., Galaktionov E.Y., Integrated monitoring of natural and technical systems as a technology for managing the reliability of engineering structures, *Problemy ehkologii v gazovoi promyshlennosti. Nauchno-tehnicheskii sbornik No. 3*, Moscow: IRC Gazprom, 2002, pp. 19–31 (in Russian).
4. Bityukova V.R., Dekhnich V.S., Kravchik A.I., Kasimov N.S., Assessment of the impact of autonomous residential heating systems on air pollution in municipalities (case study of the Baikal Region), *Vestnik Moskovskogo universiteta. Ser. 5. Geography*, 2024, No. 1, pp. 22–36 (in Russian), <https://doi.org/10.55959/MSU0579-9414.5.79.1.2>.
5. Bogoyavlensky V.I., Sizov O.S., Nikonov R.A. et al., Earth degassing in the Arctic: the genesis of natural and anthropogenic methane emissions, *Arctic: Ecology and Economy*, 2020, No. 3 (39), pp. 6–22 (in Russian), DOI: 10.25283/2223-4594-2020-3-6-22.
6. Bogoyavlensky V.I., Sizov O.S., Nikonov R.A., Bogoyavlensky I.V., Monitoring of the methane concentration changes in the Arctic atmosphere in 2019–2021 according to the TROPOMI spectrometer data, *Arctic: Ecology and Economy*, 2022, V. 12, No. 3, pp. 304–319 (in Russian), DOI: 10.25283/2223-4594-2020-3-304-319.
7. Garitskaya M.Yu., Baitelova A.I., Aleeva O.N., Chernysheva K.S., Assessment of the ecological state of the territory adjacent to the Olkhovskoye Field, *Karel'skii nauchnyi zhurnal*, 2015, No. 3 (12), pp. 91–94 (in Russian).
8. Demkina A.R., Shulepova O.V., Matrix method for integral environmental impact assessment of the Kovykta Gas Condensate Field, *AIC: Innovative Technologies*, 2024, No. 2, pp. 52–62 (in Russian).
9. *Edinyi fond geologicheskoi informatsii o nedrakh. Reestr pervichnoi i interpretirovannoi informatsii* (Unified fund of geological information on subsoil. Register of primary and interpreted information) (in Russian), 2021, <https://efgi.ru/>.
10. Ermilov O.M., Griva G.I., Moskvina V.I., *Vozdeistvie ob"ektov gazovoi promyshlennosti na severnye ehkossistemy i ehkologicheskaya stabil'nost' geotekhnicheskikh kompleksov v kriolitozone* (Impact of gas industry facilities on northern ecosystems and ecological stability of geotechnical complexes in the cryolithozone), Novosibirsk: Izd. SO RAN, 2002, 148 p. (in Russian).
11. Efimova N.V., Myl'nikova I.V., Kuz'mina M.V. et al., Carcinogenic risk assessment in population living in the ecologically problematic areas of the Irkutsk region, *Russian J. Occupational Health and Industrial Ecology*, 2019, No. 2, pp. 117–121 (in Russian), <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2019-2-117-121>.
12. Morozova A.E., Sizov O.S., Mironova M.A., Lobzhanidze N.E., Remote assessment of atmospheric air quality in populated areas of oil-and-gas specialization in the Yamalo-Nenets Autonomous Okrug, *Geodesy and Cartography*, 2023, No. 11, pp. 31–42 (in Russian), DOI: 10.22389/0016-7126-2023-1001-11-31-42.
13. *Obzor sostoyaniya i zagryazneniya okruzhayushchei sredy v Rossiiskoi Federatsii za 2023 god* (Review of the state and pollution of the environment in the Russian Federation for 2023), Moscow: Rosgidromet, 2024, 215 p. (in Russian), [https://www.meteorf.gov.ru/upload/iblock/42b/O63op%202023\\_010724.pdf](https://www.meteorf.gov.ru/upload/iblock/42b/O63op%202023_010724.pdf).
14. Porshakova A.N., Starostin S.V., Kotelnikov G.A., Environmental monitoring of oil and gas field areas: problems and prospects, *Modern Problems of Science and Education*, 2014, No. 3 (in Russian).
15. *Postanovlenie Pravitel'stva RF ot 19.03.2024 No. 329 "O federal'noi gosudarstvennoi informatsionnoi sisteme sostoyaniya okruzhayushchei sredy"* (Resolution of the Government of the Russian Federation of 19.03.2024 No. 329 "On the federal state information system of the state of the environment"), 2024 (in Russian).

16. Suleymanov R.A., Baktybaeva Z.B., Valeev T.K. et al., Environmental and hygienic environmental characteristics and public health on the territories of crude oil production and transportation, *Ulyanovsk Medico-biological J.*, 2018, No. 4, pp. 124–142 (in Russian), DOI: 10.23648/UMBJ.2018.32.22703.
17. Apicella L., De Martino M., Quarati A., Copernicus User Uptake: From data to applications, *ISPRS Intern. J. Geo-Information*, 2022, V. 11, No. 2, Article 121, 34 p., DOI: 10.3390/ijgi11020121.
18. Crippa M., Guizzardi D., Pagani F. et al., *GHG emissions of all world countries*, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2023, DOI: 10.2760/953322.
19. Feng L., Palmer P.I., Parker R.J. et al., Methane emissions are predominantly responsible for record-breaking atmospheric methane growth rates in 2020 and 2021, *Atmospheric Chemistry and Physics (ACP)*, V. 23, No. 8, pp. 4863–4880, <https://doi.org/10.5194/acp-23-4863-2023>.
20. Giglio L., Schroeder W., Hall J.V., Justice C.O., *MODIS Collection 6 and Collection 6.1. Active Fire Product User's Guide*, NASA, Washington DC, USA, 2021, 64 p.
21. Gorelick N., Hancher M., Dixon M. et al., Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone, *Remote Sensing of Environment*, 2017, V. 202, pp. 18–27, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>.
22. Lorente A., Boersma K., Eskes H. et al., Quantification of nitrogen oxides emissions from build-up of pollution over Paris with TROPOMI, *Scientific Reports*, 2019, V. 9, Article 20033, <https://doi.org/10.1038/s41598-019-56428-5>.
23. Morozova A., Sizov O., Elagin P. et al., Evaluation of the impact of COVID-19 restrictions on air pollution in Russia's largest cities, *Atmosphere*, 2023, V. 14, No. 6, Article 975, 20 p., <https://doi.org/10.3390/atmos14060975>.
24. Mousavi S.M., Dinan N.M., Ansarifard S. et al., Unveiling the drivers of atmospheric methane variability in Iran: A 20-year exploration using spatiotemporal modeling and machine learning, *Environmental Challenges*, 2024, V. 15, Article 10094, <https://doi.org/10.1016/j.envc.2024.100946>.
25. O'Neill S., Climate change action alights on satellite detection of methane, *Engineering*, 2022, V. 16, pp. 9–12, <https://doi.org/10.1016/j.eng.2022.07.003>.
26. Sabrekov A.F., Terentieva I.E., McDermid G.J. et al., Methane in West Siberia terrestrial seeps: Origin, transport, and metabolic pathways of production, *Global Change Biology*, 2023, V. 29, No. 18, pp. 5334–5351, DOI: 10.1111/gcb.16863.
27. Thoning K.W., Lan X., Crotwell A.M., Mund J.W., *Atmospheric methane from quasi-continuous measurements at Barrow, Alaska and Mauna Loa, Hawaii, 1986–present. Version: 2024-08-15*, National Oceanic and Atmospheric Administration, Global Monitoring Laboratory, Boulder, Colorado, USA, 2024, <https://doi.org/10.15138/ve0c-be70>.
28. Veefkind J.P., Aben I., McMullan K. et al., TROPOMI on the ESA Sentinel-5 Precursor: A GMES mission for global observations of the atmospheric composition for climate, air quality and ozone layer applications, *Remote Sensing of Environment*, 2012, V. 120, pp. 70–83, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.09.027>.
29. Xu J., Liu Q., Wang K. et al., Spatiotemporal variation in near-surface CH<sub>4</sub> concentrations in China over the last two decades, *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, V. 28, pp. 47239–47250, DOI: 10.1007/s11356-021-14007-0.