

УДК 504.06

DOI: 10.15372/ChUR2024537

EDN: NUBUXI

Моделирование полей рассеивания загрязняющих веществ в атмосфере от факельных установок

М. Н. АЛЕКСЕЕВА, Д. В. ФЕДОРОВ, И. В. РУССКИХ, И. Г. ЯЩЕНКО

Институт химии нефти СО РАН,
Томск, Россия

E-mail: amn@ipc.tsc.ru

(Поступила 15.12.2023; принята к печати 22.12.2023)

Аннотация

На основе климатических данных и технологических параметров факельных установок смоделированы поля рассеивания в воздухе загрязняющих веществ от действующих трех факельных установок на территории Мамонтовского месторождения в Нефтеюганском районе Ханты-Мансийского автономного округа. Рассчитаны количества загрязняющих веществ при сжигании попутного нефтяного газа, поступающие в атмосферу: монооксид углерода (CO) – 83 %, диоксид азота (NO₂) – 0.7 %, сажа – 10 %, метан – 6 %. Создана компьютерная карта растительного покрова на основе космического снимка Sentinel-2 с датой съемки 14.06.2021 г. с отображением полей рассеивания CO, NO₂ и сажи. Расстояния от источника выброса (факельной установки) до изолиний с концентрациями CO и сажи, равными 1 ПДК_{мр} (5 и 0.15 мг/м³), составляют 163 и 505 м соответственно, где ПДК_{мр} – предельно допустимая максимальная разовая концентрация. Аналогично измеренное расстояние до изолинии с концентрацией NO₂ 0.1 ПДК_{мр} (0.02 мг/м³) равно 284 м. В среднем концентрация CO уменьшается на 1 мг/м³ через 86 м и составляет 0.2 мг/м³ (0.04 ПДК_{мр}), на расстоянии около 572 м. Полученная модель полей рассеивания CO не противоречит спутниковым данным MERRA-2, согласно которым в окрестностях факельной установки концентрация CO составила 0.2 мг/м³. Хромато-масс-спектрометрический анализ образцов почв и растений, отобранных в северо-восточном направлении от факельной установки на расстояниях 216, 486, 710, 1 037 и 1 380 м, показал, что в составе их органического вещества преобладают алифатические углеводороды. Их содержание варьирует от 50 до 80 % от всех идентифицированных соединений с доминированием высокомолекулярных гомологов (C₂₇–C₃₃). Максимальное суммарное количество *n*-алканов (75.3 мкг/г) отмечено в образце почвы, находящемся на расстоянии 710 м от факельной установки. В органическом веществе игл сосны и листьев голубики доминирует гомолог C₂₇ и присутствуют C₂₅, C₂₉, C₃₁, характерные для наземной растительности. Кроме того, в почве идентифицированы полиароматические соединения – антрацен/фенантрен, флуорантен и пирен.

Ключевые слова: поля рассеивания, изолинии концентраций, MERRA-2, попутный нефтяной газ, факельные установки, углеводороды

ВВЕДЕНИЕ

На территории Ханты-Мансийского автономного округа – Югры (ХМАО) добывается 43.7 % общероссийских запасов нефти. Объем добычи попутного нефтяного газа (ПНГ) в ХМАО в 2021 г. составил 32.8 млрд м³, в том числе 31.4 млрд м³ (95.8 %) было добыто и использовано, а 1.33 млрд м³ (4.1 %) – сожжено в факелах [1].

Факела при установках предварительного сброса воды состоят в перечне источников загрязнения атмосферного воздуха на территории ХМАО. Известно [2], что в Нижневартовске очень высокий уровень загрязнения воздуха, город включен в Приоритетный список городов России с наибольшим уровнем загрязнения воздуха. В городах Белоярский, Березово, Нефтеюганск, Радужный и Сургут уровень загрязне-

ТАБЛИЦА 1

Выбросы загрязняющих веществ в 2019 и 2020 гг.

от стационарных источников в городах Ненецкого округа ХМАО по данным [3], т

Город	Твердые вещества		SO ₂		CO		NO ₂		Углеводороды		Летучие органические соединения	
	2019	2020	2019	2020	2019	2020	2019	2020	2019	2020	2019	2020
Нефтеюганск	29	319	105	144	131	310	215	245	2	3	29	114
Пыть-Ях	47	2208	14	6	2223	20162	985	1256	106	2359	284	1407

ния воздуха высокий, в Ханты-Мансийске – повышенный. В большинстве городов округа за 2018–2022 гг. отмечается рост концентраций углерода (сажи) и формальдегида, особенно значительный рост установлен в Нижневартовске. Однако в Ханты-Мансийске и Нижневартовске в 2022 г. наблюдается снижение концентраций фенола и диоксида азота (NO₂). В 2022 г. Нефтеюганск также был включен в список городов с высоким уровнем загрязнения атмосферы следующими веществами: формальдегидом, взвешенными веществами, углеродом (сажа), фенолом, NO₂. Выбросы загрязняющих веществ в атмосферу от промышленных предприятий Нефтеюганска составили: 50 т твердых веществ, 90 т SO₂, 500 т NO₂, 300 т CO [2]. За 2019 и 2020 гг. выбросы CO и NO₂ в городах Пыть-Яхе и Нефтеюганске приведены в табл. 1 [3]. В Нефтеюганске в 2022 г. по сравнению с 2020 г. увеличались выбросы NO₂ на 255 т. Наибольшие выбросы загрязняющих веществ наблюдались в 2020 г. в Пыть-Яхе (см. табл. 1).

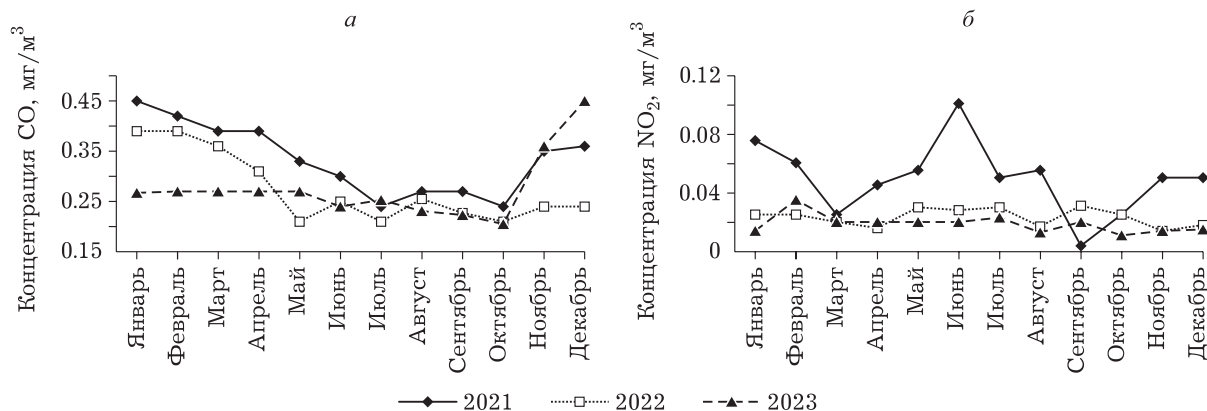
Несмотря на выбросы загрязняющих веществ, концентрации их в атмосферном воздухе невысокие [3]. По данным Ханты-Мансийского центра по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, в городе Нефтеюганске с 2021 по 2023 гг. концентрации CO варьируются от 0.1

до 0.5 мг/м³, концентрации NO₂ изменяются от 0.005 до 0.04 мг/м³ (рис. 1).

Моделирование полей рассеивания выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от предприятия со стационарными источниками выбросов проводится путем автоматизированного расчета приземных концентраций загрязнений атмосферного воздуха в границах промышленных площадок предприятий, жилой застройки и санитарно-защитных зонах [4]. Далее определяется соответствие качественных и количественных параметров выбросов предприятий санитарно-гигиеническим нормативам качества воздуха для рабочих зон, населенных пунктов, курортно-оздоровительных территорий.

Спутниковые методы позволяют проводить оценку загрязнения атмосферного воздуха отдельных участков территорий регионов [5] и стран [6–8].

Актуальность данного исследования обусловлена существующими выбросами загрязняющих веществ в атмосферный воздух от стационарных источников в районах нефтегазодобычи, что и определяет цель работы – моделирование полей рассеивания загрязняющих веществ в атмосфере от факельных установок (ФУ) на территории Нефтеюганского района.

Рис. 1. Концентрации CO (а) и NO₂ (б) в городе Нефтеюганске по наземным данным [3].

В рамках поставленной цели решались задачи:

1) Выполнить моделирование полей рассеивания загрязняющих веществ CO, NO₂, метана, сажи.

2) Сопоставить полученные результаты моделирования монооксида углерода со спутниковыми данными MERRA-2.

3) Провести отбор образцов почв и растений на площадках, расположенных в полях рассеивания загрязняющих веществ, и определить в них содержания углеводов.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Рассматриваемые в работе факельные установки (ФУ) расположены на территории Мамонтовского месторождения в Нефтеюганском районе ХМАО. Площадь Нефтеюганского района составляет 2 267 951 га, из них лесных земель – 1 245 597 га. Леса отнесены к Западно-Сибирскому среднетаежному равнинному лесному району таежной лесорастительной зоны с преобладанием травяных типов леса и лиственных насаждений [9]. Как показали исследования [5], северные леса подвержены тепловым и аэрозольным загрязнениям от действующих ФУ по сжиганию ПНГ на нефтегазодобывающих объектах. Ранее в работе [10] были выявлены участки нефтезагрязненных земель в Нефтеюганском районе ХМАО, на которых наблюдается очень высокая степень загрязнения с концентрацией нефтепродуктов в 70–145 раз выше ориентировочно допустимой. Факела находятся при установках предварительного сброса воды Мамонтовского месторождения, разрабатываемого ООО «РН-Юганскнефтегаз» (ПАО «НК «Роснефть»). Мамонтовское месторождение расположено в центральной части Западно-Сибирской равнины Салымско-Обской плоской террасовой болотно-таежной ландшафтной провинции. На установках предварительного сброса воды происходит сброс воды до остаточного содержания ее в нефти порядка 1–10 %. Производится сепарация газа, часть которого поступает на компрессорную станцию и сдается на газоперерабатывающий завод. Остаточный газ поступает для сжигания на факел низкого давления [11].

Моделирование полей рассеивания CO проводилось в унифицированной программе расчета загрязнения атмосферы (УПРЗА) ОНД-86 от 24 декабря 2018 г., она доступна в сети интернет

и разработана ГК «ЭКО центр» [12] на основе руководящего документа [13]. Данный руководящий документ в 2017 г. был преобразован в методы расчетов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе [14].

Параметрами для моделирования полей рассеивания в программе УПРЗА ОНД-86 являются: диаметр устья и высота точечного источника; температура, скорость выхода и объемный расход газозооной смеси; максимально разовый и валовый выброс загрязняющего вещества. Максимальные объемы сжигаемого ПНГ определены в соответствии с [11].

Для моделирования в программе УПРЗА ОНД-86 произведены дополнительные расчеты в соответствии с методикой [15].

Объемный расход ПНГ, сжигаемого на ФУ за секунду (W_v , м³/с), рассчитывается по формуле:

$$W_v = W / (t_{\text{дн}} t_c) \quad (1)$$

где $t_{\text{дн}}$ – время работы ФУ, сут; t_c – количество секунд в сутках (3600); W – объемный расход газа, сжигаемого на ФУ за год, м³/год.

Объемный расход продуктов сгорания, покидающих ФУ ($W_{\text{пр}}$, м³/с), рассчитывается по формуле:

$$W_{\text{пр}} = W_v V_{\text{пс}} \cdot ((273 + T_r) / 273) \quad (2)$$

где W_v – объемный расход ПНГ, сжигаемого на ФУ за секунду, рассчитываемый по формуле (1), м/с; T_r – температура горения, °C; $V_{\text{пс}}$ – количество продуктов сгорания, образующихся при стехиометрическом сгорании 1 м³ ПНГ в атмосфере влажного воздуха, рассчитано в [16], м³/м³.

Средняя скорость поступления в атмосферу продуктов сгорания ПНГ ($W_{\text{пс}}$, м/с) вычисляется как

$$W_{\text{пс}} = 1.274 W_{\text{пр}} / D_{\text{ф}}^2 \quad (3)$$

где $D_{\text{ф}}$ – диаметр факела, рассчитанный в [16], м.

Расчет максимальных выбросов вредных веществ (W_{gi} , г/с) проводится по формуле:

$$W_{gi} = 0.278 q_i W_g \quad (4)$$

где q_i – удельный выброс i -го вредного вещества на единицу массы сжигаемого газа, кг/кг; W_g – массовый расход сбрасываемого на факельной установке газа, кг/ч, который определяется по формуле:

$$W_g = 3600 \rho_r W_v \quad (5)$$

где ρ_r – плотность газа, кг/м³.

Расчет валовых выбросов вредных веществ за год ($W_{gi}(t)$, т/год) проводится по формуле:

$$W_{gi}(t) = 0.001 q_i W_g t \quad (6)$$

где t – время работы ФУ в течение года, ч.

ТАБЛИЦА 2

Максимально разовые и валовые выбросы от исследованных факельных установок (ФУ)

Компонент	СО	NO ₂	Сажа	Бенз(а)пирен	Метан
ФУ № 1					
Максимальные выбросы, г/с	13.815	0.1105	1.658	$4.42 \cdot 10^{-9}$	0.995
Валовые выбросы, т/год	435.32	3.48	52.239	$1.393 \cdot 10^{-7}$	31.34
ФУ № 2					
Максимальные выбросы, г/с	57.17	0.457	6.87	$1.83 \cdot 10^{-8}$	4.116
Валовые выбросы, т/год	93.77	0.75	11.25	$3 \cdot 10^{-8}$	6.75
ФУ № 3					
Максимальные выбросы, г/с	10	0.08	1.2	$3.2 \cdot 10^{-9}$	0.72
Валовые выбросы, т/год	315.22	2.52	37.82	$1 \cdot 10^{-7}$	22.7

В табл. 2 представлены рассчитанные максимально разовые и валовые выбросы от трех ФУ на месторождении Мамонтовское ХМАО. По полученным данным вычислены количества загрязняющих веществ, попадающих в атмосферу при сжигании ПНГ: СО – 83 %, сажа – 10 %, NO₂ – 0.7 %, метан – 6 %.

Одним из спутниковых методов исследования концентрации СО в атмосфере является MERRA-2. Это атмосферный реанализ (повторный анализ) с пространственным разрешением $0.5^\circ \times 0.625^\circ$, произведенный Управлением глобального моделирования и ассимиляции (ГМАО) Национального управления по аэронавтике и исследованию космического пространства США (NASA) [17].

В 2021 г. в зоне влияния ФУ № 3 проводили отбор проб почвы с целью определения содержания загрязняющих веществ. Отбор проб осуществляли с учетом преобладающей розы ветров на исследуемой территории. Были отобраны 5 проб почвы (рис. 2, А, Б, В, Г и Д) с поверхности земли площадок, которые находятся на разных расстояниях от ФУ (А – 216, Б – 486, В – 710, Г – 1 037, Д – 1 380 м). На площадке Б также были отобраны иглы сосны и листья голубики. Органическое вещество выделено из высушенной почвы (2–20 г) экстракцией 7%-м раствором метанола в хлороформе при 65 °С в течение 2 ч. Из органического вещества гексаном выделяли углеводородную фракцию, детальный анализ компонентного состава которой проводили с использованием хромато-масс-спектрометра DFS (Thermo Scientific, Германия).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В состав выбросов входят вещества: СО, NO₂, сажа, бенз(а)пирен, метан. Среди выбросов пре-

обладает СО: от ФУ № 1 – 435.32 т/год, от ФУ № 2 – 93.77 т/год, от ФУ № 3 – 315.22 т/год.

От ФУ № 1 и ФУ № 2 изолиния с концентрацией СО равна 5 мг/м³ (или выраженная в долях от предельно допустимой максимально разовой концентрации (ПДК_{мр}) – 1 ПДК_{мр}) и расположена на расстоянии 290 м. Изолиния с концентрацией NO₂, равная 0.02 мг/м³ (0.1 ПДК_{мр}), находится на расстоянии 625 м от ФУ. При моделировании полей концентрации сажи обнаружено превышение ПДК_{мр}. На расстоянии 722 м обнаружена концентрация 3 ПДК_{мр} (0.45 мг/м³), однако на границе санитарно-защитной зоны (1 км от ФУ) концентрация сажи не превышает 1 ПДК_{мр}.

На рис. 2 показаны изолинии концентраций СО от ФУ № 3, наложенные на карту растительного покрова, построенную на основе космического снимка (КС) Sentinel-2 с датой съемки 14.06.2021 г. Расстояния от ФУ № 3 до изолиний с концентрациями СО 1 ПДК_{мр} (5 мг/м³) и 0.2 ПДК_{мр} (1 мг/м³) составляют 163 и 508 м (см. рис. 2). Расстояния от ФУ № 3 до изолинии с концентрацией NO₂ 0.1 ПДК_{мр} (0.02 мг/м³) – 284 м; до изолинии с концентрацией сажи 1 ПДК_{мр} (0.15 мг/м³) – 505 м (см. рис. 2).

Поля рассеивания для метана и бенз(а)пирена не рассчитаны вследствие их очень малой концентрации.

По мере удаления от ФУ концентрация загрязняющих веществ в атмосфере снижается. В границах дачных участков, расположенных на юге от ФУ-3 (см. рис. 2), не наблюдается превышения ПДК_{мр} загрязняющих веществ.

Полученные результаты моделирования полей рассеивания СО не противоречат спутниковым наблюдениям. По КС MERRA-2 построена карта концентрации СО, соответствующая дате отбора проб 28.09.2021 г. (рис. 3). На карту нанесен слой точек – горевшие объекты в 2023 г. по данным интернет-портала [18]. Сделана иден-

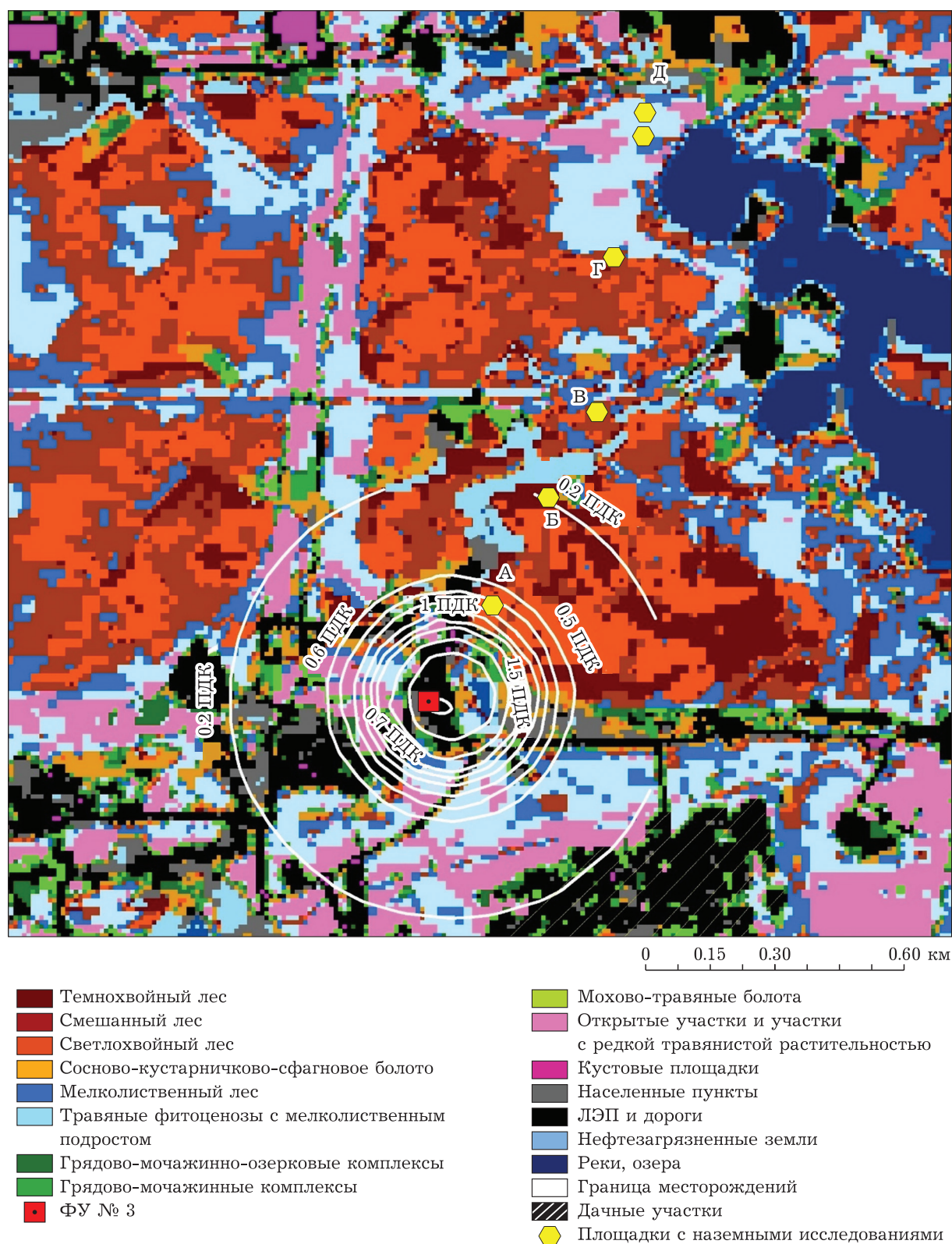


Рис. 2. Поля рассеивания СО в атмосферном воздухе вокруг факельной установки № 3 (ФУ № 3) на Мамонтовском месторождении. Буквами (А, Б, В, Г, Д) обозначены площадки с отбором образцов почвы и растительности. ПДК – предельно допустимая концентрация, ЛЭП – линии электропередачи.

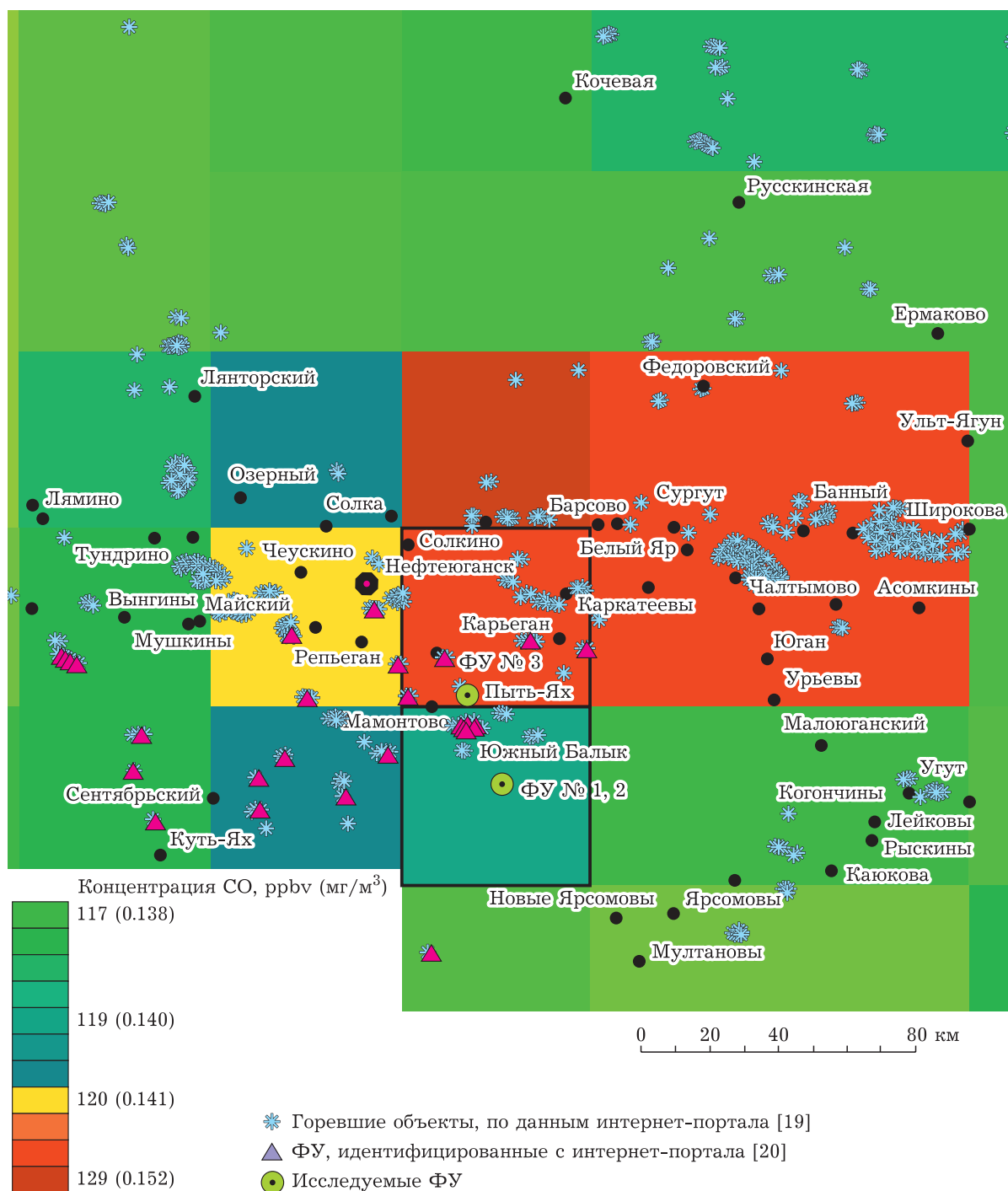


Рис. 3. Карта концентрации CO, построенная по космическому снимку Мерра-2, в дату 28.09.2021 г. ФУ – факельная установка.

тификация скопления тепловых точек по данным интернет-портала [19] с дальнейшим определением координат ФУ. Видно (см. рис. 3), что наибольшие концентрации CO в интервале 126–129 ppbv ($0.148\text{--}0.151\text{ мг}/\text{м}^3$) наблюдаются в квадратах, обозначенных красным цветом, где расположены города Нефтеюганск, Пыть-Ях, Сургут, Белый Яр. На всех площадках концен-

трации CO невысокие, составляющие в среднем $0.03\text{ ПДК}_{\text{мр}}$ ($0.2\text{ мг}/\text{м}^3$).

С помощью хромато-масс-спектрометрического анализа по молекулярным массам (m/z) в почвах и растениях были идентифицированы органические соединения: *n*-алканы и изоалканы (m/z 57), гопаны, гопены и олеанены (m/z 191), стераны (m/z 217, 218), антрацен

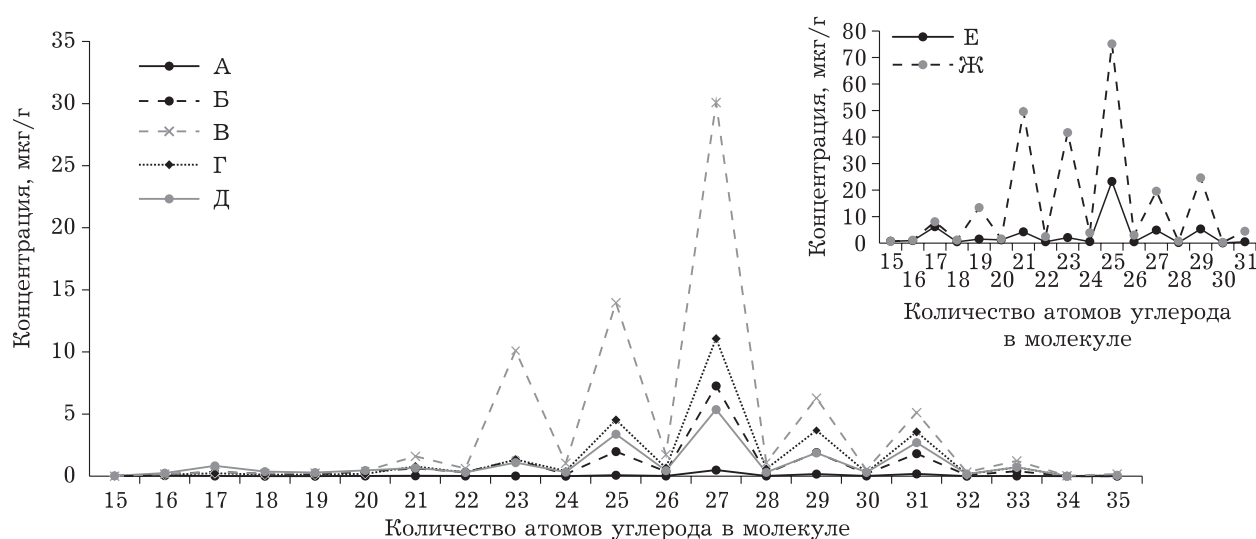


Рис. 4. Молекулярно-массовое распределение *n*-алканов в почве. Местоположение площадок (А–Д) с отбором образцов почвы см. рис. 2. На врезке отображена концентрация *n*-алканов в иглах сосны (Е) и в листьях голубики (Ж) на расстоянии 486 м от факельной установки.

(m/z 178), флуорантен и пирен (m/z 202), хлорофенотаны (m/z 235).

Молекулярно-массовое распределение *n*-алканов в почве и растениях исследованной территории представлено на рис. 4.

Хромато-масс-спектрометрический анализ показал, что в составе органического вещества растений, отобранных на площадке Б, обнаружены следы углеводов. В составе органического вещества почв преобладают алифатические углеводороды, их содержание варьирует от 50 до 80 % от всех идентифицированных соединений с доминированием высокомолекулярных гомологов (C_{27} – C_{33}). Максимальное суммарное количество *n*-алканов отмечено в образце, отобранном на площадке В (75.3 мкг/г) на расстоянии 710 м от ФУ, минимальное – на площадке А (1.21 мкг/г). В почвах, отобранных в зоне влияния факела на расстоянии до 1500 м, доминирует гомолог C_{27} , кроме него большую долю составляют гомологи C_{25} , C_{29} , C_{31} , характерные для наземной растительности [20].

Кроме того, в почве идентифицированы полиароматические соединения (ПАУ) – антрацен/фенантрен, флуорантен и пирен, которые образуются, вероятно, при сжигании газа на ФУ. Их распределение, представленное на рис. 5, указывает на увеличение концентрации по мере отдаления от источника загрязнения. Максимальное содержание ПАУ наблюдается в образце, удаленном на 1380 м от факела, что, вероятно, связано с их сгоранием, последующим рассеиванием в атмосфере и осаждением на почву.

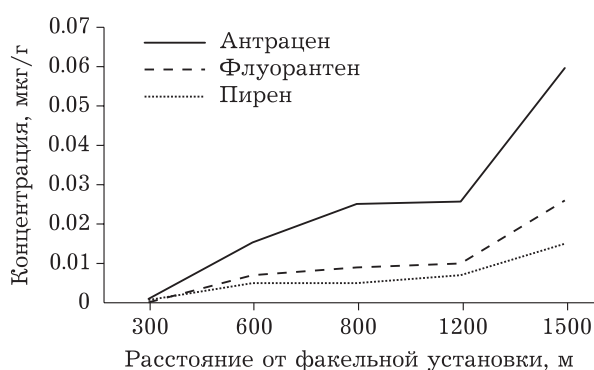


Рис. 5. Распределение полиароматических углеводородов в зоне влияния факельной установки.

Кроме того, в образцах были обнаружены мононенасыщенные соединения – гопены и олеаны, характерные для природных веществ [21].

Во всех пробах почвы, кроме фоновых образцов, были обнаружены хлорофенотаны, входящие в состав инсектицидов, использующихся при борьбе с вредителями лесного хозяйства. Их содержание выше ПДК_{мр} (ПДК_{мр} хлорофенотана в почвах составляет 0.1 мкг/г [22]) в 11–184 раз, за исключением образца А. Видимо, он попал в почву из воздуха.

В целом смоделированные концентрации CO , NO_2 , сажи не превышают 1 ПДК на границе санитарно-защитной зоны (1000 м) вокруг одного факела. По спутниковым данным MERRA-2 в районе городов Нефтеюганск и Пыть-Ях концентрации CO невысокие и составляют в среднем 0.03 ПДК_{мр} (0.15 мг/м³).

По мере удаления от ФУ снижается количество вредных веществ за счет рассеивания от высотных источников. В почве удалось обнаружить продукты горения от ФУ, характерные при сжигании органического топлива. При этом наблюдается постепенное увеличение содержания ПАУ по мере удаления от факела, что не исключает вероятную миграцию загрязняющих веществ от города Пыть-Яха и депонирования их в верхних слоях торфяной почвы. В почвах был обнаружен хлорофенотан, концентрация которого превышает ПДК_{мр} в несколько десятков раз.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в работе предложен и апробирован подход моделирования полей рассеивания загрязняющих веществ в атмосферном воздухе от ФУ с использованием комплекса технологических и климатических параметров, руководящих документов, программ, дистанционных и наземных данных. Создана компьютерная карта растительного покрова на основе KC Sentinel-2 с датой съемки 14.06.2021 г. с отображением данных полей. Расстояния от ФУ № 3 до изолиний с концентрациями 1 ПДК_{мр} (для CO), 0.1 ПДК_{мр} (для NO₂) и 1 ПДК_{мр} (для сажи) составляют 163, 284 и 505 м соответственно. В среднем концентрация CO уменьшается на 1 мг/м³ через 86 м и равна 0.2 мг/м³ на расстоянии около 572 м. Полученная модель полей рассеивания CO не противоречит спутниковым данным MERRA-2. В дату 28.09.2021 г. в окрестностях ФУ концентрация CO составила 0.2 мг/м³. Хромато-масс-спектрометрический анализ показал, что в составе органического вещества почв преобладают алифатические углеводороды, их содержание варьирует от 50 до 80 % от всех идентифицированных соединений с доминированием высокомолекулярных гомологов (C₂₇–C₃₃). Максимальное суммарное количество *n*-алканов (75.3 мкг/г) отмечено в образце, находящемся на расстоянии 710 м от ФУ. В иглах сосны и листьях голубики доминирует гомолог C₂₇ и присутствуют C₂₅, C₂₉, C₃₁, характерные для наземной растительности. Кроме того, в почве идентифицированы ПАУ – антрацен/фенантрен, флуорантен и пирен.

Данный подход позволяет проводить мониторинговые исследования состояния окружающей природной среды удаленных северных нефтегазодобывающих территорий.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИХН СО РАН (НИОКТР № 121031500046-7), финансируемого Министерством науки и высшего образования Российской Федерации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Об экологической ситуации в Ханты-Мансийском автономном округе – Югре в 2021 году [Электронный ресурс]: доклад. URL: <https://prirodnadzor.admhmao.ru/doklady-i-otchyety/doklad-ob-ekologicheskoy-situatsii-v-khanty-mansiyskom-avtonomnom-okruge-yugre/7644301/2021-god/> (дата обращения: 28.02.2024).
- 2 Состояние загрязнения атмосферы в городах на территории России за 2022 г. : ежегодник / Федер. служба России по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, Гл. геофиз. обсерватория им. А. И. Воейкова. СПб.: Росгидромет, 2023. 2542 с.
- 3 Атмосферный воздух [Электронный ресурс] / Служба по контролю и надзору в сфере охраны окружающей среды, объектов животного мира и лесных отношений Ханты-Мансийского авт. округа – Югры. URL: <https://prirodnadzor.admhmao.ru/sostoyanie-okruzhayushchey-sredy/atmosfernyy-vozdukh/> (дата обращения: 28.02.2024).
- 4 Кошкарев С. А. Сокращение выбросов АЗС на основе моделирования их рассеивания // Альтернативная энергетика и экология. 2015. № 7. С. 82–92.
- 5 Алексеева М. Н., Яценко И. Г. Спутниковый мониторинг состояния окружающей природной среды в зоне воздействия нефтегазового комплекса Томской области // Соврем. проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19, № 1. С. 158–169.
- 6 Ситнов С. А., Мохов И. И., Джола А. В. Общее содержание оксида углерода в атмосфере над российскими регионами по спутниковым данным // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2017. Т. 53, № 1. С. 38–55.
- 7 Mao M., Zhou Y., Zhang X. Evaluation of MERRA-2 black carbon characteristics and potential sources over China // Atmosphere. 2023. Vol. 14, No. 9. P. 1378–1394.
- 8 Lacima A., Petetin H., Soret A., Bowdalo D., Jorba O., Chen Z., Turrubiates R. M., Achebak H., Ballester J., García-Pando C. P. Long-term evaluation of surface air pollution in CAMSRA and MERRA-2 global reanalyses over Europe (2003–2020) // Geosci. Model Dev. 2023. Vol. 16, No. 9. P. 2689–2718.
- 9 Об утверждении лесохозяйственного регламента Нефтеюганского лесничества и признании утратившими силу некоторых приказов Департамента природных ресурсов и несырьевого сектора экономики Ханты-Мансийского автономного округа – Югры [Электронный ресурс]: приказ Департамента недропользования и природных ресурсов авт. округа от 05.07.2018 № 36-нп. URL: <https://depprirod.admhmao.ru/dokumenty/prik/1852597/> (дата обращения: 28.02.2024).
- 10 Алексеева М. Н., Федоров Д. В., Русских И. В., Яценко И. Г. Дистанционно-наземный мониторинг нефтезагрязненных земель Нефтеюганского района ХМАО // Оптика атмосферы и океана. 2023. Т. 36, № 6 (413). С. 513–520.
- 11 Федоров Д. В., Алексеева М. Н., Русских И. В., Яценко И. Г. Риск воздействия факельных установок на среднетаежные ландшафты ХМАО-Югра // XV Сибирское совещание и школа молодых ученых по климато-экологическому мониторингу: Материалы докладов всероссий-

- ской конференции с международным участием, Томск, 17–20 октября 2023, – Томск, 2023. С. 269–272.
- 12 УПРЗА “ЭКО центр” [Электронный ресурс] : руководство пользователя. URL: <https://eco-c.ru/public/emission/%D0%A3%D0%9F%D0%A0%D0%97%D0%90%20%C2%AB%D0%AD%D0%9A%D0%9E%20%D1%86%D0%B5%D0%BD%D1%82%D1%80%C2%BB.%20%D0%A0%D1%83%D0%BA%D0%BE%D0%B2%D0%BE%D0%B4%D1%81%D1%82%D0%B2%D0%BE%20%D0%BF%D0%BE%D0%BB%D1%8C%D0%B7%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D1%82%D0%B5%D0%BB%D1%8F.pdf> (дата обращения: 28.02.2024).
- 13 Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий [Электронный ресурс]: ОНД-86: утв. 04. 08. 1986. Л.: Госкомгидрмет, 1987. URL: <https://meganorm.ru/Data2/1/4294853/4294853873.htm> (дата обращения: 28.02.2024).
- 14 Об утверждении методов расчетов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе [Электронный ресурс] : приказ Мин-ва природных ресурсов и экологии Рос. Федерации от 06 июня 2017 г. № 273. URL: <https://docs.cntd.ru/document/456074826?ysclid=lt5i4fhkcr947353690> (дата обращения: 28.02.2024).
- 15 Методика расчета выбросов вредных веществ в атмосфере при сжигании попутного нефтяного газа на факельных установках [Электронный ресурс] / Науч.-исслед. ин-т охраны атмосферного воздуха Минприроды РФ. СПб., 1997. 41 с. URL: <https://meganorm.ru/Data2/1/4294849/4294849187.pdf> (дата обращения: 28.02.2024).
- 16 Расчет выбросов вредных веществ в атмосферу при сжигании попутного нефтяного газа на факельных установках [Электронный ресурс]. URL: <https://intertreid2.okis.ru/PO.html> (дата обращения: 10.03.2023).
- 17 NASA Earthdata [Electronic resource]. URL: <https://disc.gsfc.nasa.gov/> (accessed 28.02.2024).
- 18 FIRMS [Electronic resource] : fire information for resource management system. URL: <https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov> (accessed 28.02.2024).
- 19 USGS [Electronic resource] : EarthExplorer. URL: <https://earthexplorer.usgs.gov/> (accessed 28.02.2024).
- 20 Peters K. E., Walters C. C., Moldowan J. M. The Biomarker Guide. 2nd. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2005. 1155 p.
- 21 Дучко М. А., Гулая Е. В., Серебрянникова О. В., Стрельникова Е. Б., Прейс Ю. И., Распределение *n*-алканов, стероидов и тритерпеноидов в торфе и растениях болота Тёмное // Изв. Томского политехн. ун-та. 2013. Т. 323, № 1. С. 40–44.
- 22 Об утверждении санитарных правил и норм СанПиН 1.2.3685–21 “Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания” : постановление от 28 января 2021 г. № 2. М., 2021. 469 с.