

УДК 551.510.53

ВЛИЯНИЕ ЭМИССИЙ ГОРЕНИЯ ИСКОПАЕМЫХ ТОПЛИВ И ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ НА КАЧЕСТВО ВОЗДУХА ГОРОДСКОЙ СРЕДЫ ПРОМЫШЛЕННОГО ЦЕНТРА ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

© 2024 г. Д. А. Хозяинова^а, О. Б. Поповичева^{б, *}, М. А. Чичаева^а,
Р. Г. Ковач^а, В. Ю. Слободян^с, Н. С. Касимов^а

^аГеографический факультет, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
ГСП-1, Ленинские горы, 1, стр. 2, Москва, 119991, Россия

^бНИИЯФ, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
ГСП-1, Ленинские горы, 1, стр. 2, Москва, 119991, Россия

^сАО «Институт экологического проектирования и изысканий»,
Ленинские горы, д. 1, стр. 75г Москва, 119234, Россия

*e-mail: olga.popovicheva@gmail.com

Поступила в редакцию 24.04.2024 г.

После доработки 19.06.2024 г.

Принята к публикации 10.07.2024 г.

В настоящее время особое внимание уделяется оценке качества воздуха промышленных городов в регионах, чувствительных к экологическим и климатическим изменениям. Исследования аэрозольной нагрузки атмосферы проведены в г. Новый Уренгой — промышленном центре Севера Западной Сибири — в летне-осенний сезон 2023 года. На базе мобильного Аэрозольного комплекса в реальном времени измерены счетная концентрация частиц, массовые концентрации частиц размером менее 10 мкм (PM_{10}) и 2.5 мкм ($PM_{2.5}$), и черного углерода (BC) — наиболее экологически значимой компоненты загрязненной атмосферы. Вклад эмиссий горения ископаемых топлив FF% и биомасс BV% оценен на основе аэталометрической модели. Кластерный анализ распределения BC зависимости от скорости и направления указал местоположение сектора источников высоких концентраций. Уровень BC увеличивался в четырех эпизодах загрязнения в среднем в 2 раза в сравнении с уровнем городских эмиссий. Концентрация eBC в эпизоде максимального загрязнения возрастала до 4 раз, а процент сжигания ископаемых топлив FF% достигал 96%. По распределению FF% выявлено направление влияния эмиссий крупнейшего промышленного источника ТЭК УНГКМ, по BV% зарегистрирован эпизод влияния дымовых эмиссий природных пожаров на юге Сибири.

Ключевые слова: качество воздуха, городские эмиссии, горение, черный углерод

DOI: 10.31857/S0002351524050069 EDN: HXWNWG

1. ВВЕДЕНИЕ

В ситуации глобальных изменений климата, в центре научных исследований оказываются показатели качества воздуха и их влияние на здоровье населения [Kuula et al., 2022]. До настоящего времени эти показатели включали концентрации ряда газообразных примесей, а так же крупнодисперсных частиц размером до 10 мкм (PM_{10}) и мелкодисперсной вдыхаемой фракции частиц размером до 2.5 мкм ($PM_{2.5}$) [Ревич, 2018; Elansky et al., 2018]. Всемирной организацией здравоохра-

нения и агентствами по защите окружающей среды в разных странах, включая РФ, были введены нормативы по предельно допустимым концентрациям среднего годового и суточного содержания PM_{10} и $PM_{2.5}$ (см. детальнее [Поповичева, 2021]).

Временная изменчивость дисперсных фракций аэрозолей важна для понимания процессов образования и накопления загрязнения в атмосфере города [Аршинов и Белан, 2000]. Современные исследования физико-химических характеристик аэрозолей показывают, что число,

распределение по размерам и площадь поверхности частиц, осажденных в легких, в значительной степени определяются уровнем антропогенной нагрузки городской среды [Vratolis et al., 2019; Liu et al., 2023]. Химический состав аэрозолей определяется источником загрязнения (транспорт, промышленность, строительство, система отопления, дорожная пыль, природные пожары) [Amato et al., 2016] и сильно варьирует в зависимости от сезона, численности и экономической активности населения [Almeida et al., 2020; Popovicheva et al., 2024a]. Выделяются особенности влияния источников загрязнения на состояние атмосферы в развитых промышленных городах [Chen et al., 2019; Landis et al., 2019; Marinaite et al., 2022]. Исследования токсичности фракции $PM_{2,5}$ в выхлопах автомобилей показывают значительное увеличение по сравнению с городской средой [Luo et al., 2023]. На основе совместного анализа уровня PM_{10} и $PM_{2,5}$ и опасного воздействия микрочастиц в атмосфере на здоровье населения обосновывается необходимость введения новых маркеров качества воздуха и количественного анализа основных источников загрязнения городской среды [Daellenbach et al., 2020].

Среди экологически опасных аэрозольных компонентов выделяется черный углерод, образующийся в результате горения ископаемых топлив в двигателях внутреннего сгорания [Lighty et al., 2000], факельных установках [Popovicheva et al., 2019b] и при горения биомасс в природных пожарах и системах отопления [Popovicheva et al., 2015]. Глобальные антропогенные выбросы чёрного углерода оцениваются примерно в 7,2 тераграмм в год и составляют ~15% от выбросов $PM_{2,5}$, для транспортного сектора эта величина достигает 50% [Klimont et al., 2017]. В атмосфере частицы чёрного углерода формируют наиболее опасную и токсичную компоненту $PM_{2,5}$ [Paisi et al., 2024].

Особую опасность черный углерод представляет в городской среде с большим количеством источников эмиссий, повышенной транспортной нагрузкой и высокой плотностью населения. Увеличение риска хронических и респираторных заболеваний определили черный углерод важнейшим индикатором опасного влияния на здоровье [Janssen et al., 2011]. Разрабатываемый в настоящее время подход к стандартизации измерений чёрного углерода и его источников позволил включить его в число новых показателей качества воздуха

в городах Европы, особенно в северных регионах, наиболее чувствительных к климатическим изменениям [Fung et al., 2022; Savadkoobi et al., 2023; Trechera et al., 2023].

Благодаря способности поглощать солнечное излучение, черный углерод является короткоживущим климатическим трассером, вторым после углекислого газа [Assessment, 2021]. Он вызывает нагрев атмосферы, ускорение таяния снега и льда, увеличение радиационного воздействия на климат Арктики [Lee et al., 2013]. Перенос эмиссий промышленных регионов, жилого сектора, транспорта зимой и лесных пожаров летом определяют уровень загрязнения атмосферы Арктического региона черным углеродом [Виноградова и Васильева, 2017; Popovicheva et al., 2019a; Belan et al., 2022]. Особую роль играют крупномасштабные лесные пожары [Kozlov et al., 2016; Mokhov et al., 2020]. Локальные источники выбросов ВС в Арктике влияют на состояние экосистемы в целом [Schmale et al., 2018]. Анализ аэрозольного состава атмосферы особенно актуален в городах Арктического региона, где транспорт, промышленность с одной стороны и шлейфы сибирских пожаров с другой приводят к высокой степени загрязнения атмосферы [Evans et al., 2015; Рапута и др., 2017; Поповичева и др., 2020; Schneider et al., 2024].

Север Западной Сибири — один из промышленно развитых регионов России. На территории Ямало-Ненецкого автономного округа (ЯНАО) уровень техногенного воздействия при освоении недр является определяющим в формировании экологической обстановки [Виноградова, 2014]. Разработка современной технологии экодиагностики состояния окружающей среды в ЯНАО была начата установкой Аэрозольного комплекса МГУ вблизи г. Салехард [Поповичева и др., 2020]. На острове Белый проведены длительные сезонные измерения и анализа пространственного распределения антропогенных источников черного углерода зимой и лесных пожаров летом [Поповичева и др., 2022; Поповичева и др., 2023; Popovicheva et al., 2023].

Данная работа посвящена анализу влияния эмиссий горения ископаемых топлив и лесных пожаров на атмосферу промышленного центра ЯНАО. На базе Аэрозольного комплекса МГУ проведены непрерывные наблюдения в г. Новый Уренгой с июня по сентябрь 2023 г. Представлены результаты измерений счетного числа частиц

N, массовых концентраций черного углерода, $PM_{2.5}$ и PM_{10} . Развита методика анализа основных источников загрязнения атмосферы города. Проведена оценка уровня аэрозольной нагрузки атмосферы под воздействием топливно-энергетического комплекса Уренгойского нефтегазоконденсатного месторождения (ТЭК УНГКМ) и лесных пожаров.

2. МЕТОДЫ АНАЛИЗА

2.1. Регион исследования

Город Новый Уренгой является промышленным центром крупного нефтегазодобывающего региона на территории ЯНАО (см. карту рис. 1). Он находится в непосредственной близости от ТЭК УНГКМ, который занимает площадь 6500 км², состоит из 2800 эксплуатационных скважин [<https://geonovosti.terratech.ru/economy/razvitie-neftegazovykh-mestorozhdeniy-na-primere-urengoyskogo-mestorozhdeniya/>]. https://ru.wikipedia.org/wiki/Природный_газ <https://ru.wikipedia.org/wiki/Россия> На предприятиях УНГКМ добывается 74% всего газа России. В районе Лембеяха расположено ещё одно крупное предприятие — «Уренгойская ГРЭС». Технологические мощности городских предприятий пищевой промышленности, коммунального хозяйства, строительных и ремонтных компаний, теплоснабжения 15-ти котельных значительно меньше. В городе проживает немного более 106 тыс. человек, 80% населения работает в топливно-добывающей сфере. Транспортная нагрузка города невысока; все основные промплощадки вынесены к границе города. В регионе увеличивается доля газа в качестве топлива для автомобильной техники.

2.2. Инструментальный Аэрозольный комплекс

Инструментальный Аэрозольный комплекс МГУ (АК МГУ) установлен в центре г. Новый Уренгой (66°6'32" с.ш., 76°40'45" в.д.) на берегу реки Седе-Яха, разделяющей город на Северный и Южный районы (рис. 1). Месторасположение выбрано так, чтобы при смене направления ветра АК МГУ находился под воздействием определенных источников: на севере — спального района, на юге — многофункциональной городской зоны, где расположены большинство учреждений, железнодорожный вокзал и аэропорт, на западе — незаселенного лесотундрового ландшафта, на се-

веро-востоке, востоке и юго-востоке — промышленных зон и объектов инфраструктуры ТЭК УНГКМ, завода для подготовки природного газа, Новоуренгойского газохимического комплекса, инженерно-технических объектов, где расположены скважины добычи и факелы технологического сжигания газоконденсата. Ближайшая факельная установка находилась на расстоянии 7.3 км.

Цикл непрерывных измерений на АК МГУ проводился в течение 107 дней с 7 июня по 21 сентября 2023 года. Инструментальный комплекс мобильного мониторинга представляет собой систему мобильного мониторинга аэрозольных характеристик в реальном времени и отбора проб. Он включает диффузионный аэрозольный спектрометр ДАС 2702-М производства «Аэро-НаноТех» для измерения счётной концентрации N частиц с размером 0.2–10 мкм и оценки массовой концентрации $PM_{2.5}$ и PM_{10} . Спектрометр ДАС калибровался в стационарных условиях на Аэрозольном комплексе МГУ [<https://www.geogr.msu.ru/science/projects/IAC/>] в течение месяца до отправки в экспедицию с помощью фирменных приборов мировых сетей: оптического счетчика частиц OPS 3330, TSI (включен в состав АК МГУ в 2020 году) и осциллирующих микровесов TEOM 1400, Thermo Fisher Scientific (входит в состав станции измерения воздуха «МГУ» сети ГПБУ «Мосэкомониторинг»). Регрессионный анализ счётной концентрации общего числа частиц по данным ДАС и OPS 3330 в указанном диапазоне показал высокую степень линейной зависимости с коэффициентами детерминации R^2 равным 0.85 и линейной регрессии 0.6. Массовые концентрации PM_{10} и $PM_{2.5}$ рассчитывались в программном обеспечении ДАС в предположении сферичности частиц. Регрессионный анализ по данным ДАС и TEOM 1400 показал на удовлетворительную степень линейной зависимости с R^2 равными 0.62 и 0.61 и коэффициентами линейной регрессии 1.73 и 0.8, соответственно.

Массовая концентрация эквивалента черного углерода (equivalent black carbon, eBC) определялась оптическим методом с помощью аэталометра AE33 (Magee Scientific), входящего в состав АК МГУ с 2020 года. Работа прибора основана на непрерывном отборе аэрозолей из атмосферы при разных скоростях потока воздуха и одновременном измерении ослабления излучения, проходящего через два фильтра, а также через рефе-

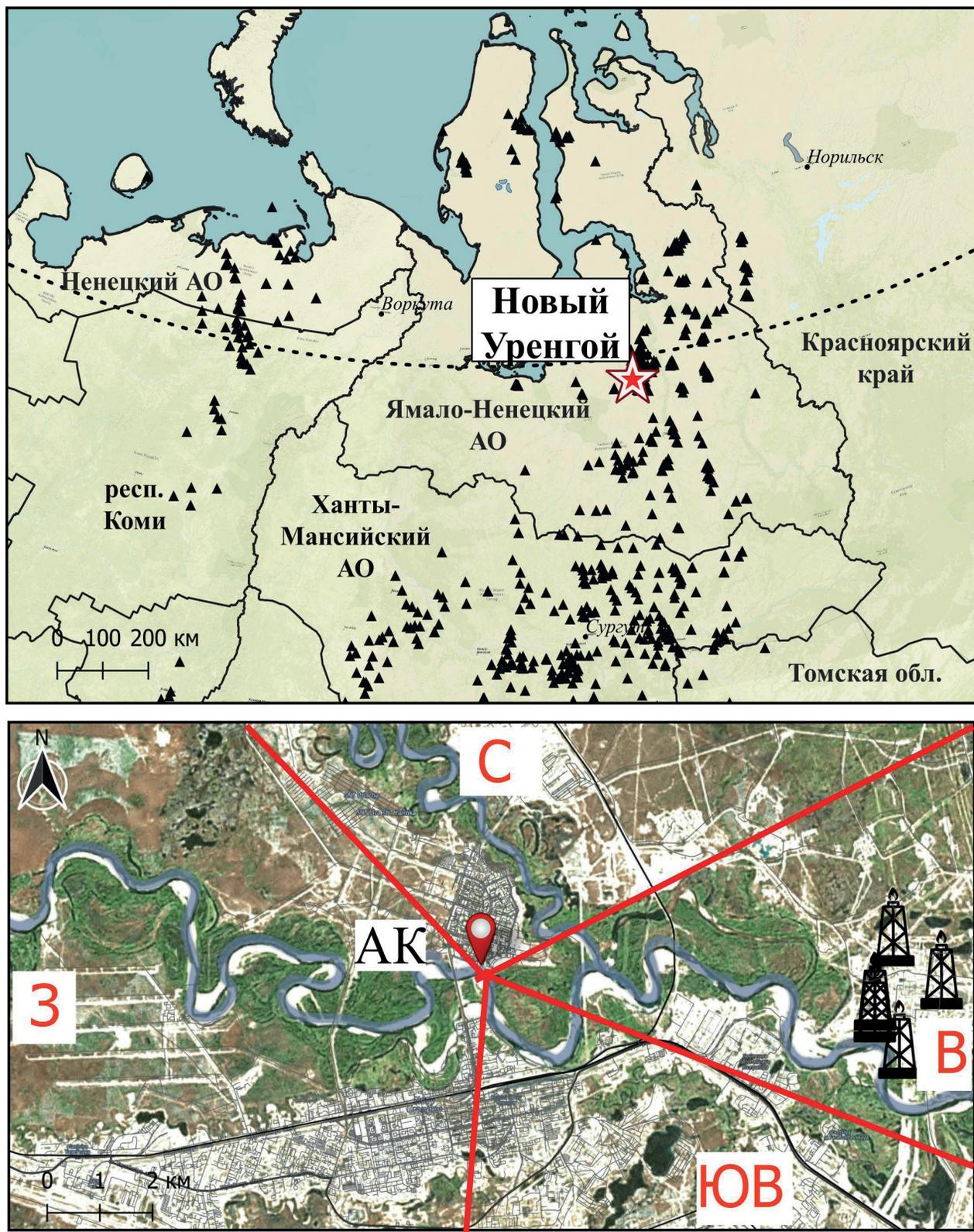


Рис. 1. Слева: город Новый Уренгой на карте Западной Сибири, указаны расположения газовых факелов нефтяных и газоконденсатных месторождений. Внизу: расположение Аэрозольного комплекса МГУ (АК) и объектов УНГКМ в Новый Уренгой. Секторы пространственного распределения источников черного углерода указаны линиями и названиями.

ренс-фильтр без прокачки воздуха [Drinovec et al., 2015]. Аэталометр AE33 обеспечивает измерение поглощения излучения осажденными на фильтре частицами на семи длинах волн в диапазоне от ультрафиолетового до инфракрасного с разрешением 1 мин. Массовая концентрация eBC в эмиссиях сжигания природного ископаемого топлива (дизельного, бензинового, газа) оценивалась по изменению ослабления излучения на длине волны $\lambda = 880$ нм. Поглощение органических и минеральных компонентов атмосферных аэрозолей на этой длине волны мало [Sandradewi et al., 2008]. На коротких длинах волн значительно увеличивается поглощение продуктов горения биомасс (сжигания древесины, дымов пожаров) [Zhang et al., 2017; Popovicheva et al., 2022].

Измерительная система комплекса находилась в металлических контейнерах, оснащенных влаго- и ветрозащитой, источником бесперебойного питания, обогревателем и охладителем для поддержания оптимальной температуры. Забор воздуха производился на высоте 2.5 м с использованием импакторов PM_{2.5}. Сайт RP5 метеостанции аэропорта Новый Уренгой (66°4'22"с.ш., 76°31'24"в.д.) обеспечивал метеоданные.

2.3. Анализ наблюдений

Оценка вклада сжигания ископаемых топлив и биомасс в измеренные концентрации eBC производилась с помощью аэталометрической модели на основе спектральной зависимости коэффициента поглощения b_{abs} от длины волны λ в предположении суммарного поглощения продуктов сжигания во всем спектре измерения и степенной зависимости спектрального поглощения, определяемой коэффициентом Ангстрема $\alpha_{ff} = 1$ при горении ископаемых топлив (fossil fuel, ff) и $\alpha_{bb} = 2$ при сжигании древесины (biomass burning, bb) [Sandradewi et al., 2008]. Расчеты проводились на двух длинах волн $\lambda = 470$ и 950 нм согласно уравнениям:

$$\frac{b_{abs}(470)_{ff}}{b_{abs}(950)_{ff}} = \left(\frac{470}{950}\right)^{-a_{ff}}, \quad (1)$$

$$\frac{b_{abs}(470)_{bb}}{b_{abs}(950)_{bb}} = \left(\frac{470}{950}\right)^{-a_{bb}}, \quad (2)$$

$$b_{abs}(470) = b_{abs}(470)_{ff} + b_{abs}(470)_{bb}, \quad (3)$$

$$b_{abs}(950) = b_{abs}(950)_{ff} + b_{abs}(950)_{bb}. \quad (4)$$

Определялся процент вклада сжигания биомасс (biomass burning, BB%) и природных топлив (fossil fuel, FF%) как

$$BB\% = \frac{b_{abs}(950)_{bb}}{b_{abs}(950)}, \quad (5)$$

$$FF\% = 100\% - BB\%. \quad (6)$$

Для исследования пространственного распределения источников применен метод построения розы загрязнений в полярных координатах направления и скорости ветра [Uria-Tellaetxe and Carslaw, 2014]. Кластеризация данных двумерного распределения eBC в зависимости от направления и скорости ветра проведена методом k-means на основе признака схожести [Govender and Sivakumar, 2020], определяемом концентрацией eBC, зональной и меридиональной компонентами направления ветра.

Рассчитан массив обратных траекторий переноса воздушных масс с шагом 1 ч на высоте 500 м над уровнем земли на основе модели HYSPLIT лаборатории «Air Resources Laboratory» [Stein et al., 2015] и архивных метеорологических данных GDAS [<http://www.arl.noaa.gov/ready>] с пространственным разрешением 1° широты и 1° долготы. Региональное распределение источников черного углерода определялось путем соотношения обратных траекторий переноса воздушных масс за период наблюдений к концентрации eBC в момент их прихода в точку наблюдения. Карты построены посредством ГИС-пакета QGIS.

Информация об очагах пожаров получена из базы данных Fire Information for Resource Management System (FIRMS) системы NASA/ESDIS [<https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/map>] спутникового зондирования термоактивных точек на поверхности земли. Для наблюдения шлейфов пожаров использовались космоснимки системы NASA/EOSDIS WORLDVIEW [<https://worldview.earthdata.nasa.gov/>]. Расположение газовых факелов ТЭК определялось по данным спутников VIIRS о свечении объектов с температурой выше 1200°C [<https://viirs.skytruth.org/apps/heatmap/>].

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

3.1. Метеорологические условия

Метеорологические параметры в период измерений с 7 июня по 21 сентября 2023 года характеризовались высокой изменчивостью. Период с 7 по 23 июня был облачным и прохладным со средней температурой $6.9 \pm 3.8^\circ$, с 24 по 30 июня погода изменилась на ясную, температура увеличилась в среднем $13.5 \pm 3.7^\circ$. Июль был ясным и жарким ($18.3 \pm 5.7^\circ$). В августе средняя температура была $13.8 \pm 6.2^\circ$, в сентябре похолодало до $8.6 \pm 4.2^\circ$. Осадки были зафиксированы 51 раз из 857 наблюдений, в среднем 3 ± 4 мм. Почти половина из них (24 мм) выпала 29 июля, еще 13 мм — 24 июля. В остальные дни осадков более 9 мм не наблюдалось. Три четверти суммарных осадков за период наблюдений выпало 24 и 29 июля (13 и 24 мм, соответственно), во время одного из рассмотренных далее эпизодов загрязнения.

За период наблюдений преобладали ветры северных направлений со стороны многоэтажной селитебной застройки. Роза ветров за весь период наблюдений показывает ветры преимущественно северо-восточного, северного и северо-западного направлений с частотой повторяемости 17%, 15% и 10% (рис. 2а). Скорость ветра w_s в среднем составляла 3.7 ± 2 м/с.

3.2. Аэрозольная нагрузка атмосферы города

Аэрозольная нагрузка атмосферы города определяется временной динамикой основных характеристик: счетной концентрацией общего числа частиц N , массовыми концентрациями PM_{10} , $PM_{2.5}$ и eBC . Временной ход счетной концентрации N в диапазоне размеров от 200 нм до 10 мкм и массовых концентраций PM_{10} , $PM_{2.5}$ за весь период измерений представлен на рис. 3а, б, в). Наблюдается значительная варьируемость

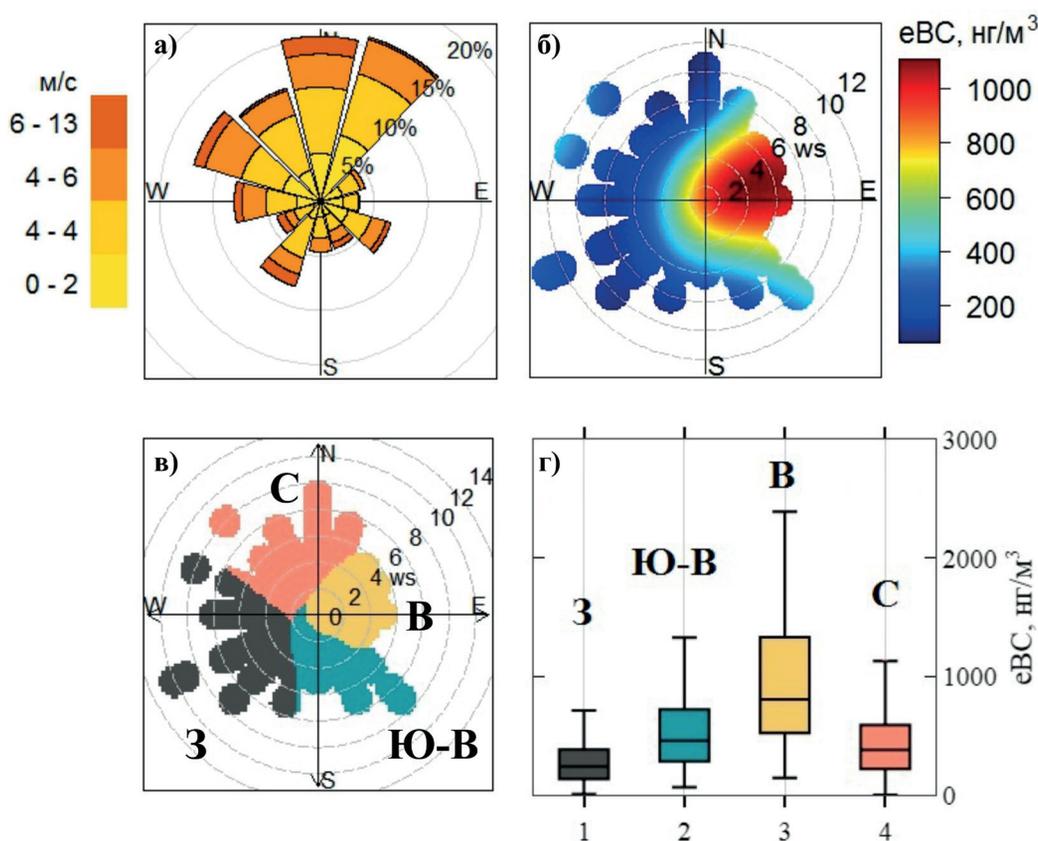


Рис. 2. а) Роза ветров; б) двумерное распределение eBC в зависимости от направления и скорости ветра (w_s); в) кластерный анализ распределения eBC в зависимости от скорости и направления ветра. Цветом показаны кластеры западный (3), юго-восточный (Ю-В), восточный (В) и северный (С); г) концентрации eBC в кластерах. Линией внутри ящичной диаграммы с ограничителями выбросов указаны медианные значения, нижняя и верхняя границы соответствуют 25- и 75-му перцентилям, вертикальными линиями обозначены экстремумы.

Таблица. Средняя массовая концентрация eBC, счетная концентрация N, массовая концентрация PM_{2.5} и PM₁₀, средний вклад сжигания ископаемых топлив FF% и биомасс ВВ%, среднее отношение eBC/PM_{2.5} и PM_{2.5}/PM₁₀ на уровне городского фона, в эпизоды загрязнения и за весь период измерений с 7 июня по 21 сентября 2023 г.

Период	N, см ⁻³	PM _{2.5} , мкг/м ³	PM ₁₀ , мкг/м ³	eBC, мкг/м ³	FF%	ВВ%	eBC/PM _{2.5}	PM _{2.5} /PM ₁₀	
Уровень городского фона	119±110	5±3	16±9	0.5±0.3	88±5	12±5	0.1±0.1	0.3±0.1	
I	24.06–28.06	111±37	5±2.5	15±8	1±0.6	93±4	7±4	0.3±0.1	0.2±0.1
II	22.07–29.07	493±122	15±4	31±11	1.4±0.6	90±9	10±9	0.5±0.1	0.1±0.03
III	1.08–8.08	275±158	12±5	30±7	1.2±0.7	92±7	8±7	0.4±0.1	0.1±0.1
IV	6.09–8.09	141±59	11±6	36±22	2±1.2	96±2	4±2	0.3±0.03	0.2±0.03
Весь период наблюдения	158±151	7±5	18±11	0.7±0.6	89±6	11±6	0.15±0.1	0.4±0.1	

указанных характеристик. Средняя счетная концентрация N за весь период измерений составила 158 ± 151 см⁻³ (таблица), что уступает в два-три раза среднему уровню счетной концентрации частиц в диапазоне 200–500 нм в центре и пригороде мегаполиса в летний сезон [Vratolis et al., 2019], а в диапазоне 100–500 нм значениям, полученным в наблюдениях на 62-х наземных станциях сети GAW за исключением высокогорных и арктических [Rose et al., 2021]. Максимальные массовые концентрации PM₁₀ и PM_{2.5} достигали 51 мкг/м³ и 25 мкг/м³ 23 июля и 1 августа. Среднесуточные значения PM₁₀ и PM_{2.5} за все время наблюдений не превышали предельно допустимые концентрации (ПДК) для PM₁₀ (60 мкг/м³) и PM_{2.5} (35 мкг/м³). Средняя массовая концентрация PM_{2.5} и PM₁₀ составила 7 ± 5 и 18 ± 11 мкг/м³ (Таблица). Отношение концентраций PM_{2.5}/PM₁₀, характеризующее вклад мелкодисперсных частиц, в среднем было небольшое, 0.4 ± 0.1 , что указывает на значительную долю крупнодисперсных частиц почвы и пыли в аэрозольной нагрузке атмосферы Нового Уренгоя.

Временной ход массовой концентрации eBC за весь период наблюдений с 7 июня по 21 сентября 2023 года представлен на рисунке 3г. Наблюдается значительная варьированность, максимальные значения 2.3, 2.7, 3.4 и 4.2 мкг/м³ зарегистрированы 8 июня, 26 июля, 3 августа и 7 сентября. Средняя массовая концентрация eBC за весь период измерений составила 0.7 ± 0.6 мкг/м³ (таблица). Такой уровень характерен для городов в летний сезон (см. ссылки в [Popovich et al., 2020]). По сравнению с крупными городами РФ Новый Уренгой

уступает немного: летом средний уровень eBC на условно-фоновой станции в Томске составил 0.8 ± 0.4 мкг/м³ [Козлов и др., 2010], в Москве 1.0 ± 0.2 мкг/м³ [Popovich et al., 2022].

Ранее городские эмиссии черного углерода исследовались вблизи г. Салехард [Поповичева и др., 2020]. Средняя концентрация eBC в среднем в июне и июле 2019 г. была 0.15 ± 0.1 мкг/м³, значительно ниже наблюдаемого в Новом Уренгое. Салехард — административный центр ЯНАО, определяющие источники загрязнения его городской среды — теплоэнергетика и автотранспорт, использующие дизель, бензин и газ в качестве топлива. Значение BC/PM_{2.5} в среднем 0.1 ± 0.1 в атмосфере Нового Уренгоя за весь период измерений значительно уступает характерному для городской среды с высокой транспортной нагрузкой [Klimont et al., 2017].

Анализ временной изменчивости массовых концентраций eBC позволяет выделить значения 12-ти часовых средних концентраций, превышающие пороговую величину 0.85 мкг/м³, оцененную как 75% персентилей значений eBC за время всего периода измерений. Определены четыре эпизода загрязнения каждый длительностью более суток в конце июня (I) и июля (II), в начале августа (III) и сентября (IV) (рис. 3г). В целом, эпизоды загрязнений длились 25.3% всего времени измерений. Концентрации eBC ниже порогового соответствуют уровню городского фона, равному в среднем 0.5 ± 0.3 мкг/м³ (таблица). За весь период эпизодов загрязнений средняя концентрация eBC в 2.5 раза превысила уровень городского фона (1.3 ± 0.8 мкг/м³) (таблица).

Эпизоды загрязнения II и III сопровождались повышенной счетной концентрацией N в диапазоне от 200 нм до 10 мкм, в среднем до $493 \pm 122 \text{ см}^{-3}$ и $275 \pm 158 \text{ см}^{-3}$ (рис. 3а). В субмикронном и микронном диапазонах спектра по размерам формируются и накапливаются вторичные аэрозоли (сульфаты, нитраты), частицы почвы, пыли и морской соли [Eleftheriadis et al., 2014], поэтому уровни повышенных концентраций N в результате увеличения частиц в этих диапазонах не всегда

совпадают с эпизодами загрязнения eBC , что наблюдается на рис. 3а и г.

Городские эмиссии характеризуется низкими концентрациями $PM_{2.5}$ и PM_{10} , в среднем $5 \pm 3 \text{ мкг/м}^3$ и $16 \pm 9 \text{ мкг/м}^3$. Эпизоды загрязнения выделяются повышенными концентрациями (таблица); за весь период загрязнений средняя концентрация в ~ 2 раза превышала уровень городских эмиссий для $PM_{2.5}$ ($11 \pm 5 \text{ мкг/м}^3$) и в 1.8 раза для PM_{10} ($28 \pm 13 \text{ мкг/м}^3$). Отношение

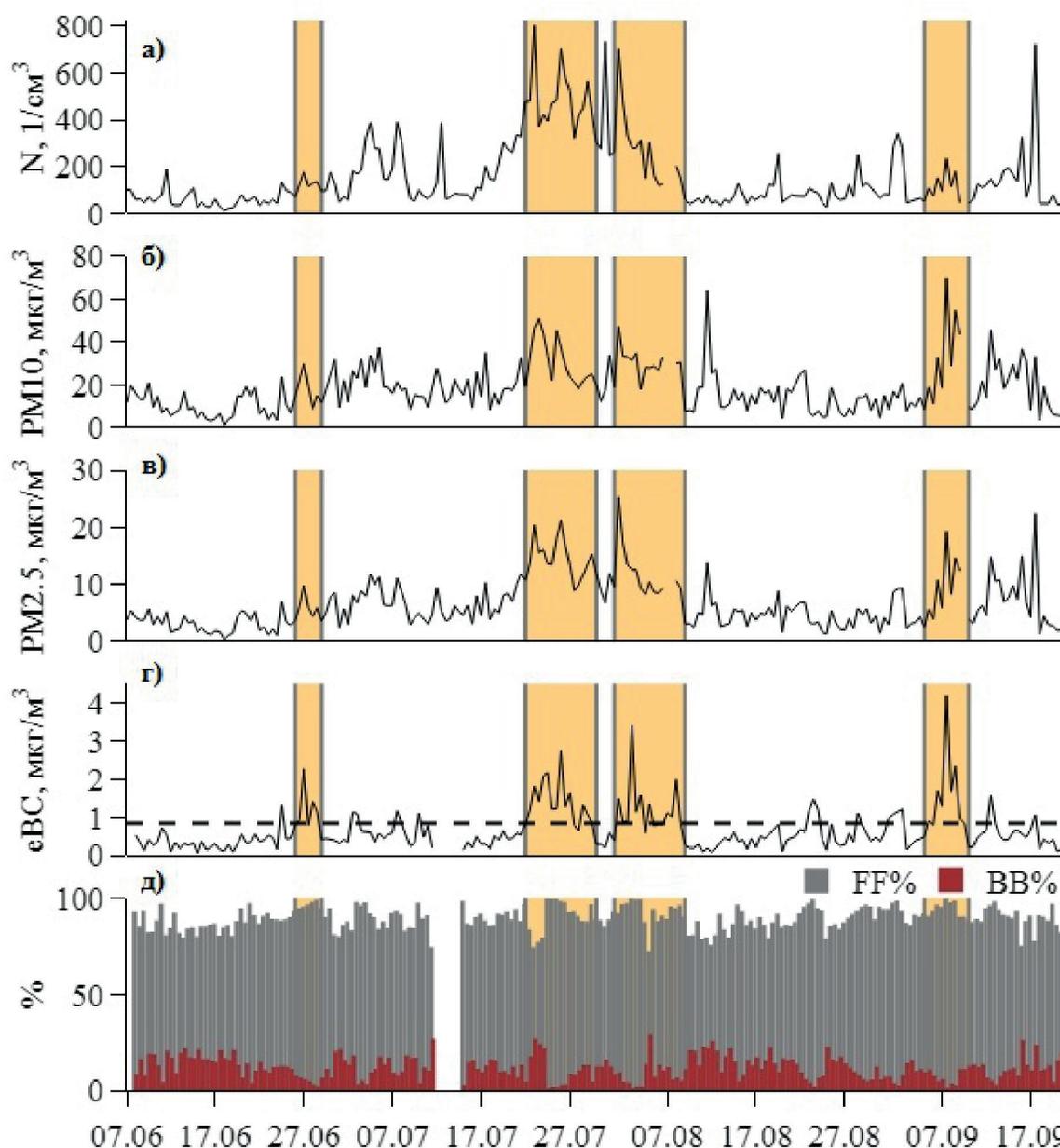


Рис. 3. Временной ход с усреднением 12 часов (а) счетной концентрации общего числа частиц N , массовой концентрации (б) PM_{10} , (в) $PM_{2.5}$, (г) eBC и (д) вклада сжигания ископаемых топлив $FF\%$ и биомасс $BB\%$ с 7 июня по 21 сентября 2023 года. Пунктиром указан пороговый уровень эпизодов загрязнения. Указаны четыре периода загрязнения, определенные по превышению концентрации eBC порогового уровня.

eBC/PM_{2.5} увеличивалось в периоды эпизодов загрязнения почти в 2 раза по сравнению с периодами низких концентраций, указывая на обогащение аэрозолей дымовой компонентой. В период максимального эпизода загрязнения IV оно было в 5 раз выше (0.5 ± 0.1).

3.3. Черный углерод и источники загрязнения

За время наблюдений высокие концентрации черного углерода (более 800 нг/м^3) наблюдались при застойной погоде (w_s менее 1 м/с), в направлениях ветров восточного, северо-восточного и юго-восточного направлений (w_s более 1 м/с) (рис. 2б). Концентраций более 300 нг/м^3 не зарегистрировано при w_s выше 2 м/с в восточном и 4 м/с в северном и южном направлениях. Анализ двумерного распределения eBC по направлению и скорости ветра выделил четыре кластера (рис. 2в), данные статистической обработки которых представлены на рисунке 2г). Кластеры восточный (В), юго-восточный (Ю-В), северный (С), а также западный (З) характеризуются наивысшим 800 , 260 , 380 нг/м^3 и наименьшим 240 нг/м^3 медианными значениями, соответственно. Географическое местоположение секторов, определенных кластерным анализом указано на рис. 1. Направление источников (наивысших концентраций) черного углерода определяется в восточном секторе, где расположены объекты инфраструктуры ТЭК УНГКМ. Наивысшие концентрации eBC более 1000 нг/м^3 , измеренные при скоростях ветра в диапазоне более 2 м/с (рис. 2б), указывают на удаленный источник в этом направлении. В секторах (С) спального района города и (Ю-В) многофункциональной городской зоны определяются средние уровни загрязнения черным углеродом. В секторе (З) минимальных концентраций оказался юго-западный район города и незаселенный лесотундровый ландшафт.

Расчеты вклада сжигания ископаемых топлив и биомасс за весь период наблюдения проводились по формулам (1–6). Временной ход FF% и ВВ% представлен на рисунке 2д). В среднем уровни FF% и ВВ% характеризуются значением $89 \pm 6\%$ и $11 \pm 6\%$ (таблица). Отметим низкий ВВ% по сравнению с уровнем для многих городов Европы, где сжигание биомасс (древесины для отопления в жилом секторе) превышает 13% и достигает максимума 39% [Savadkoohi et al.,

2023]. В летний период в Москве (где население не использует биомасс) зарегистрирован уровень $10 \pm 5\%$, определяемый дальним переносом эмиссий сжигания биомасс из региона вокруг мегаполиса [Popovichcheva et al., 2024b].

24–28 июня наблюдался период загрязнения I, в котором концентрация eBC в среднем ($1 \pm 0.6 \text{ мкг/м}^3$) в 2 раза превысила уровень городского фона (таблица). Для данного периода характерен высокий процент FF% (рис. 2д), достигший $93 \pm 4\%$, что свидетельствует о значительном преобладании в то время продуктов горения ископаемых топлив. 22–29 июля в эпизоде загрязнения II концентрация eBC была в среднем $1.4 \pm 0.6 \text{ мкг/м}^3$, что более, чем в 2.5 раза превысило уровень городского фона. В начале данного эпизода с 22 по 24 июля FF% упал до $78 \pm 4\%$, возрос процент сжигания биомасс ВВ%, который достиг 23 июля наивысшего значения 26% . В это время счетная концентрация общего числа частиц N и массовая концентрация PM₁₀ достигли наиболее высоких за все время наблюдения значений 800 см^{-3} и 46.4 мкг/м^3 (рис. 3а,б) в результате поступления пылевой компоненты аэрозолей вместе с дымовыми шлейфами.

С 1 по 8 августа, в эпизод загрязнения III концентрация eBC ($1.2 \pm 0.7 \text{ мкг/м}^3$) более, чем в 2 раза превосходила уровень городского фона, наблюдался высокий FF% ($92 \pm 7\%$). Эпизод высокого ВВ% порядка 28% 5 августа был зарегистрирован 5 августа при низкой концентрации eBC и скорости ветра, что указывает на локальный источник горения вблизи места наблюдения. Рекордно высокая концентрация eBC в период загрязнений IV ($2.0 \pm 1.2 \text{ мкг/м}^3$) в 4 раза превысила уровень городских эмиссий. Для этого периода был зарегистрирован самый высокий процент FF% ($96 \pm 2\%$).

Анализ двумерного распределения вклада сжигания природных топлив FF% в зависимости от скорости и направления ветра подтверждает восточное направление источника (рис. 4). Наибольший процент FF% в период I отмечается в северо-западном и северо-восточном направлениях при скоростях порядка 3 м/с . В периоды наиболее высоких эпизодов загрязнений II, III и IV вклад FF% более 92% отмечается при ветрах северо-восточного направления и скоростях более 3 м/с . В это время в месте расположения АК в направлении объектов ТЭК УНГКМ наблюдались дымовые шлейфы удаленных факельных установок,

что предполагает вклад процесса сжигания углеводородов в повышенную концентрацию черного углерода в эпизодах загрязнения.

Расчеты двумерной функции распределения ВВ% в зависимости от скорости и направления во время эпизода загрязнения II (с 22 по 29 июля) указывают на источник высокого вклада, более 20%, в юго-западном направлении (рис. 5а). Согласно сводкам ФБУ «Авиалесохрана» данных дистанционного мониторинга [<https://aviales.ru/>] в этот период значительное число пожаров было зарегистрировано в таежных лесах Красноярского края, ХМАО, и ЯНАО общей площадью 4377 га, в лесных и лесостепных зонах Южного Урала и Поволжья общей площадью 1500 га. Траекторный анализ, проведенный 23 июля с целью определения направления регионального источника пожарных эмиссий во время достижения ВВ% наивысшего значения, показал перенос воздушных масс из Красноярского края и с северных

территорий Казахстана (рис. 5б). Над территорией ЯНАО воздушные массы совершили поворот на северо-восток в направлении Нового Уренгоя, проходили над областями пожаров в Надымском и Пуровском районах ЯНАО.

Работа выполнена при поддержке проекта РНФ № 22-17-00102 и Института экологического Проектирования и изысканий. Инструментальная поддержка Аэрозольного комплекса МГУ проведена на базе гранта на обновление оборудования для научных исследований в рамках федерального проекта «Развитие передовой инфраструктуры для проведения исследований и разработок в Российской Федерации» национального проекта «Наука и университеты».

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования, проведенные на Аэрозольном комплексе в Новом Уренгое, продемонстрировали современные достижения инструментальной

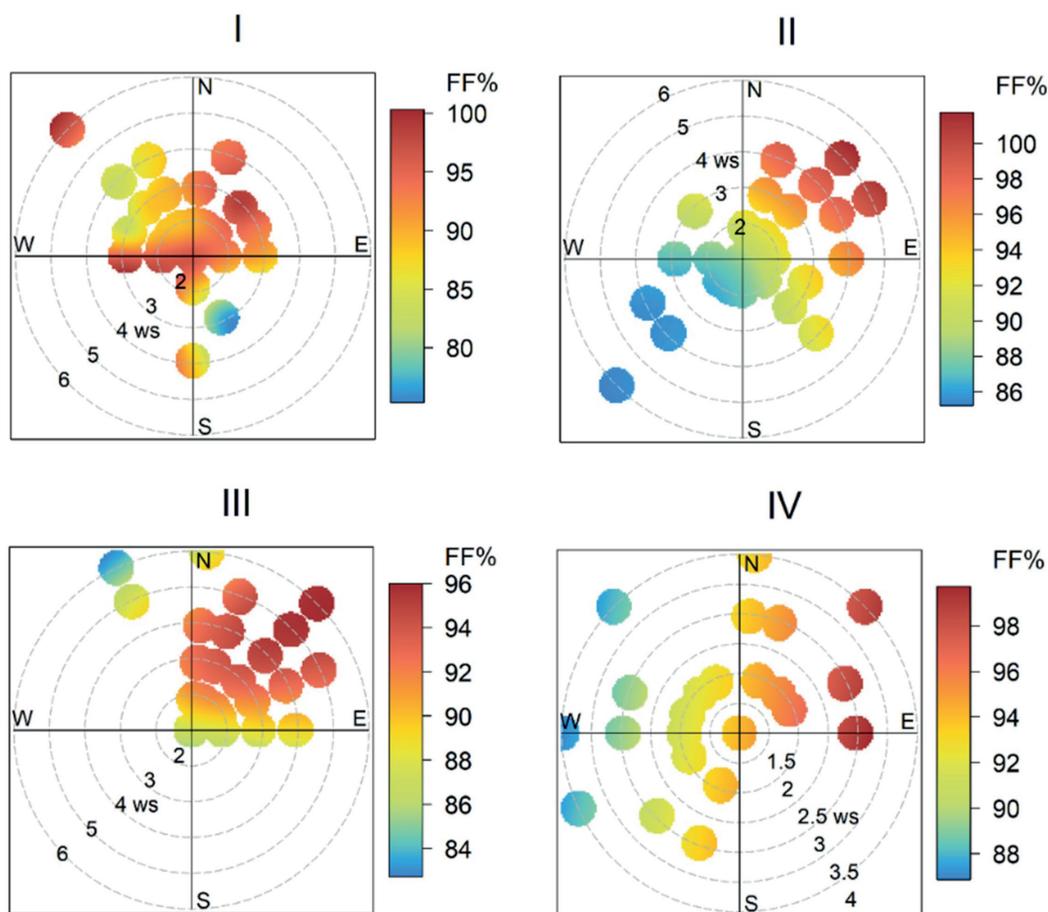


Рис. 4. Вклад сжигания ископаемых топлив FF% в зависимости от скорости и направления ветра в периоды загрязнения I, II, III и IV.

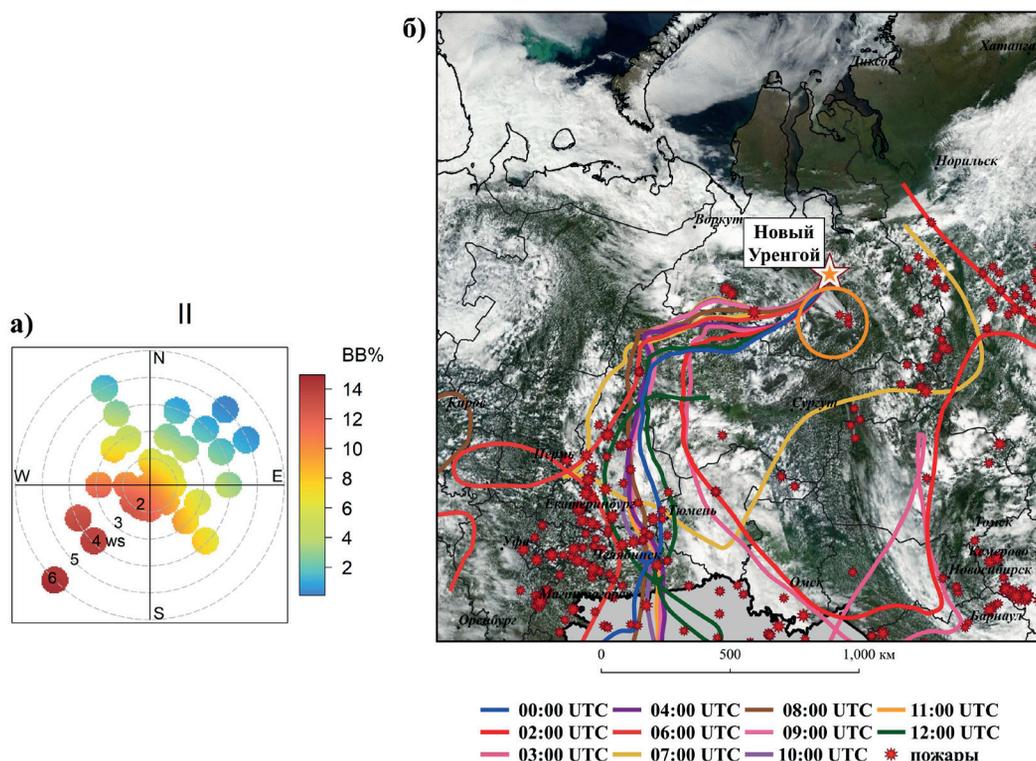


Рис. 5. а) Двумерное представление процента вклада сжигания биомасс $BV\%$ в зависимости от скорости и направления ветра в эпизод загрязнения II с 22 по 29 июля, б) космоснимок и обратные траектории воздушных масс 23 июля на высоте 500 м над землёй; указаны время и дата прихода на АК. Красными точками показаны пожары с 23 по 27 июля, кругом — область дымовых шлейфов вблизи Нового Уренгоя.

системы экологического мониторинга состояния атмосферы в промышленном центре Арктического региона. Оценка качества воздуха в Новый Уренгой в летне-осенний сезон показывает уровни счетной концентрации общего числа частиц и массовой концентрации черного углерода, характерные для городов с невысокой аэрозольной нагрузкой, где среднесуточные значения $PM_{2.5}$ и PM_{10} не превышают предельно допустимые концентрации. Концентрация черного углерода определяется влиянием эмиссий транспорта, объектов ТЭК УНГКМ, городских предприятий, средний уровень немного уступает крупным городам РФ и значительно превосходит административный центр ЯНАО город Салехард. Вклад черного углерода в $PM_{2.5}$ значительно ниже характерного для городской среды с большой транспортной нагрузкой. Особенностью вариабельности концентрации черного углерода являются эпизоды загрязнений, наблюдавшиеся в 25% всего времени наблюдений. Источник наивысших концентраций черного углерода зарегистрирован в восточном и северо-восточном направлении располо-

жения объектов инфраструктуры ТЭК УНГКМ и факельных установок сжигания углеводородов. Анализ влияния эмиссий горения показывает высокий вклад сжигания ископаемых топлив и низкий вклад продуктов горения биомасс, что определяется географическим положением промышленного центра в субарктической зоне тайги и в центре газоносной провинции Западной Сибири. В эпизод максимального увеличения процента сжигания биомасс в юго-западном направлении зарегистрированы шлейфы дымовых эмиссий природных пожаров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Аршинов М.Ю., Белан Б.Д. Суточный ход концентрации микродисперсной фракции аэрозоля // Оптика атмосферы и океана. 2000. Т. 13. № 11. С. 983–990.
- Виноградова А. А. Эмиссии антропогенного черного углерода в атмосферу: распределение по территории России // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27. № 12. С. 1059–1065.
- Виноградова А.А., Васильева А.В. Черный углерод в воздухе северных районов России: источники,

- пространственные и временные вариации // Оптика атмосферы и океана. 2017. V. 30. P. 467–475.
- Козлов В.С., Панченко М.В., Яушева Е.П.* Субмикронный аэрозоль и сажа приземного слоя в суточном ходе // Оптика атмосферы и океана. 2010. Т. 23. С. 561–569.
- Поповичева О.Б., Кобелев В.О., Синуцкий А.И., Ситников Н.М., Чичаева М.А., Хансен А.* Черный углерод городских эмиссий в Арктическом регионе по данным вблизи г. Салехарда // Оптика атмосферы и океана. 2020. Т. 33. С. 690–697. doi: 10.15372/AOO20200905.
- Поповичева О.Б., Чичаева М.А., Касимов Н.А.* Влияние ограничительных мер во время пандемии COVID–19 на аэрозольное загрязнение атмосферы московского мегаполиса // Вестник Российской академии наук. 2021. Т. 91. № 4. С. 351–361. doi: 10.31857/S0869587321040083.
- Поповичева О.Б., Чичаева М.А., Кобелев В.О., Касимов Н.С.* Региональные источники загрязнения атмосферы Арктики черным углеродом по данным измерений на острове Белый // Оптика атмосферы и океана. 2022. Т. 35. №12. С. 1–7. doi: 10.15372/AOO20221212.
- Поповичева О.М., Чичаева М.А., Ковач Р.Г., Касимов Н.С., Кобелев В.О., Синуцкий А.И.* Лесные пожары как источник черного углерода в Арктике летом 2022 г. // Арктика: экология и экономика. 2023. Т. 13. № 2. С. 257–270. doi: 10.25283/2223-4594-2023-2-257-270.
- Рапута В.Ф., Попова С.А., Макаров В.И., Ярославцева Т.В.* Определение связей органического и элементного углерода по секторам выноса атмосферных примесей // Оптика атмосферы и океана. 2017. Т. 30. № 10. С. 878–882. doi: 10.15372/AOO20171010.
- Ревич Б.А.* Мелкодисперсные взвешенные частицы в атмосферном воздухе и их воздействие на здоровье жителей мегаполисов // Проблемы экологического мониторинга и моделирование экосистем. 2018. Т. 29. № 3. С. 53–78. doi: 10.21513/0207-2564-2018-3-53-78
- Almeida S., Manousakas M., Diapouli E., Kertesz Z., Sametk L., Hristova E., Šega K., Alvarez R.P., Belis C., Eleftheriadis K.* Ambient particulate matter source apportionment using receptor modelling in European and Central Asia urban areas // Environmental Pollution. 2020. V. 266. P. 11. doi:10.1016/j.envpol.2020.115199.
- Amato F., Alastuey A., Karanasiou A., Lucarelli F., Nava S., Calzolari G., Severi M., Becagli S., Gianelle V., Colombi C.* AIRUSE-LIFE+: A harmonized PM speciation and source apportionment in five southern European cities // Atmospheric Chemistry Physics 2016. V. 16. P. 3289–3309. doi:10.5194/acp-16-3289-2016.
- Assessment A.* Impacts of Short–Lived Climate Forcers on Arctic Climate, Air Quality, and Human Health // Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP). 2021. doi:10.5194/acp-22-5775-2022.
- Belan B.D., Ancellet G., Andreeva I.S., Antokhin P.N., Arshinova V.G., Arshinov M.Y., Balin Y.S., Barsuk V.E., Belan S.B., Chernov D.G.* Integrated airborne investigation of the air composition over the Russian Sector of the Arctic // Atmospheric Measurement Techniques. 2022. V. 15. P. 3941–3967. doi:10.5194/amt-15-3941-2022.
- Chen W., Tian H., Qin K.* Black Carbon Aerosol in the Industrial City of Xuzhou, China: Temporal Characteristics and Source Apportionment // Aerosol and Air Quality Research. 2019. Т. 19. P. 794–811. doi:10.4209/aaqr.2018.07.0245.
- Daellenbach K.R., Uzu G., Jiang J., Cassagnes L.-E., Leni Z., Vlachou A., Stefenelli G., Canonaco F., Weber S., Segers, A.* Sources of particulate-matter air pollution and its oxidative potential in Europe // Nature. 2020. V. 587. P. 414–419. doi:10.1038/s41586-020-2902-8.
- Drinovec L., Močnik G., Zotter P., Prévôt A., Ruckstuhl C., Coz E., Rupakheti M., Sciare J., Müller T., Wiedensohler, A.* The "dual-spot" Aethalometer: an improved measurement of aerosol black carbon with real-time loading compensation // Atmospheric Measurement Techniques. 2015. V. 8. P. 1965–1979. doi:10.5194/amt-8-1965-2015.
- Elansky N.F., Ponomarev N.A., Verevkin Y.M.* Air Quality and Pollutant Emissions in the Moscow Megacity in 2005–2014 // Atmospheric Environment. 2018. V. 175. P. 54–64. doi:10.1016/j.atmosenv.2017.11.057
- Eleftheriadis K., Ochsenkuhn K.M., Lympelopoulou T., Karanasiou A., Razos P., Ochsenkuhn–Petropoulou M.* Influence of local and regional sources on the observed spatial and temporal variability of size resolved atmospheric aerosol mass concentrations and water-soluble species in the Athens metropolitan area // Atmospheric Environment. 2014. V. 97. P. 252–261. doi:10.1016/j.atmosenv.2014.08.013.
- Evans M., Kholod N., Malyshev V., Tretyakova S., Gusev E., Yu S., Barinov A.* Black carbon emissions from Russian diesel sources: case study of Murmansk // Atmospheric Chemistry and Physics. 2015. V. 15. P. 8349–8359. doi:10.5194/acp-15-8349-2015.
- Fung P.L., Sillanpää S., Niemi J.V., Kousa A., Timonen H., Zaidan M.A., Saukko E., Kulmala M., Petäjä T., Hussein, T.* Improving the current air quality index with new particulate indicators using a robust statistical approach. The Science of The Total Environment. 2022. V. 844. P. 14. doi:10.1016/j.scitotenv.2022.157099.

- Govender P., Sivakumar V.* Application of k-means and hierarchical clustering techniques for analysis of air pollution: A review (1980–2019) // *Atmospheric pollution research*. 2020. V. 11. P. 40–56. doi:10.1016/j.apr.2019.09.009.
- Janssen N.A.H., Hoek G., Simic-Lawson M., Fischer P., van Bree L., ten Brink H., Keuken M., Atkinson R.W., Anderson H.R., Brunekreef B., Cassee F.R.* Black carbon as an additional indicator of the adverse health effects of airborne particles compared with PM10 and PM2.5 // *Environmental Health Perspectives*. 2011. V. 119. P. 1691–1699. doi: 10.1289/ehp.1003369.
- Klimont Z., Kupiainen K., Heyes C., Purohit P., Cofala J., Rafaj P., Borken-Kleefeld J., Schöpp W.* Global anthropogenic emissions of particulate matter including black carbon. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*. 2017. V. 17. P. 8681–8723. doi:10.5194/acp-2016-880.
- Kozlov V.S., Panchenko M.V., Shmargunov V.P., Chernov D.G., Yausheva E.P., Pol'kin V.V., Terpugova S.A.* Long-term investigations of the spatiotemporal variability of black carbon and aerosol concentrations in the troposphere of West Siberia and Russian Subarctic. *Химия в интересах устойчивого развития*. 2016. V. 24. P. 423–440. doi: 10.15372/KhUR20160401.
- Kuula J., Timonen H., Niemi J.V., Manninen H.E., Rönkkö T., Hussein T., Fung P.L., Tarkoma S., Laakso M., Saukko E.* Opinion: Insights into Updating Ambient Air Quality Directive (2008/50/EC) // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2022. V. 22. P. 4801–4808. doi:10.5194/acp-2021-854.
- Landis M.S., Studabaker W.B., Pancras J.P., Graney J.R., White E.M., Edgerton, E.S.* Source apportionment of ambient fine and coarse particulate matter polycyclic aromatic hydrocarbons at the Berta Ganter-Fort McKay community site in the Oil Sands Region of Alberta, Canada // *The Science of The Total Environment*. 2019. V. 666. P. 540–558. doi:10.1016/j.scitotenv.2019.02.126.
- Lee Y.H., Lamarque J.F., Flanner M.G., Jiao C., Shindell D.T., Berntsen T., Bisiaux M.M., Cao J., Collins W.J., Curran M., Edwards R., Faluvegi G., Ghan S., Horowitz L.W., McConnell J.R., Ming J., Myhre G., Nagashima T., Naik V., Rumbold S.T., Skeie R.B., Sudo K., Takemura T., Thevenon F., Xu B., Yoon J.H.* Evaluation of preindustrial to present-day black carbon and its albedo forcing from ACCMIP (Atmospheric Chemistry and Climate Model Intercomparison Project) // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2013. V. 13. P. 2607–2634. doi:10.5194/acpd-12-21713-2012.
- Lighty J.S., Veranth J.M., Sarofim A.F.* Combustion aerosols: factors governing their size and composition and implications to human health // *Journal of the Air & Waste Management Association*. 2000. V. 50. P. 1565–1618. doi: 10.1080/10473289.2000.10464197.
- Liu X., Hadiatullah H., Zhang X., Trechera P., Savadkoobi M., Garcia-Marlès M., Reche C., Pérez N., Beddows D.C., Salma I.* Ambient air particulate total lung deposited surface area (LDSA) levels in urban Europe // *The Science of The Total Environment*. 2023. V. 898. P. 11. doi:10.1016/j.scitotenv.2023.165466.
- Luo X.-S., Huang W., Shen G., Pang Y., Tang M., Li W., Zhao Z., Li H., Wei Y., Xie, L.* Source differences in the components and cytotoxicity of PM 2.5 from automobile exhaust, coal combustion, and biomass burning contributing to urban aerosol toxicity // *EGUsphere*. 2023. 1–25. doi:10.5194/egusphere-2023-598.
- Marinaite I., Penner I., Molozhnikova E., Shikhovtsev M. and Khodzher T.* Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Atmosphere of the Southern Baikal Region (Russia): Sources and Relationship with Meteorological Conditions // *Atmosphere*. 2022. V. 13. P. 420. doi:10.3390/atmos13030420.
- Mokhov I., Bondur V., Sitnov S., Voronova O.* Satellite monitoring of wildfires and emissions into the atmosphere of combustion products in Russia: Relation to atmospheric blockings. *Doklady Earth Sci.* 2020. V. 495. P. 921–924. doi:10.1134/S1028334X20120089.
- Paisi N., Kushta J., Pozzer A., Violaris A., Lelieveld J.* Health effects of carbonaceous PM2.5 compounds from residential fuel combustion and road transport in Europe // *Scientific Reports*. 2024. V. 14. P. 1530. doi: 10.1038/s41598-024-51916-9.
- Popovicheva O., Chichaeva M., Kobelev V., Kasimov N.* Black carbon seasonal trends and regional sources on Bely Island (Arctic) // *Atmospheric and Oceanic Optics*. 2023. V. 36. P. 176–184. doi: 10.1134/s1024856023030090.
- Popovicheva O., Chichaeva M., Kovach R., Zhdanova E., Kasimov N.* Seasonal, weekly, and diurnal black carbon in Moscow megacity background under impact of urban and regional sources // *Atmosphere*. 2022. V. 13. P. 563. doi: 10.3390/atmos13040563.
- Popovicheva O., Diapouli E., Chichaeva M., Kosheleva N., Kovach R., Bitukova V., Eleftheriadis K., Kasimov N.* Aerosol characterization and peculiarities of source apportionment in Moscow, the largest and northernmost European megacity. *The Science of The Total Environment*. 2024a. V. 918. P. 20. doi:10.1016/j.scitotenv.2024.170315.
- Popovicheva O., Diapouli E., Makshtas A., Shonija N., Manousakas M., Saraga D., Uttal T., Eleftheriadis K.* East Siberian Arctic background and black carbon polluted aerosols at HMO Tiksi // *The Science of The Total Environment*. 2019a. V. 655. P. 924–938. doi:10.1016/j.scitotenv.2018.11.165.
- Popovicheva O., Timofeev M., Persiantseva N., Jefferson M.A., Johnson M., Rogak S.N., Baldelli A.* Microstructure and

- chemical composition of particles from small-scale gas flaring // *Aerosol and air quality research*. 2019b. V. 19. P. 2205–2221. doi: 10.4209/aaqr.2019.04.0177.
- Popovicheva O.B., Chichaeva M.A., Kovach R.G., Zhdanova E.Y., Stepanenko V.M., Varentsov A., Kasimov N.S.* Impact of wave COVID–19 responses on black carbon air pollution in Moscow megacity background // *Aerosol and Air Quality Research*. 2024b. V. 24. P. 230266. doi: 10.4209/aaqr.230266.
- Popovicheva O.B., Kozlov V.S., Engling G., Diapouli E., Persiantseva N.M., Timofeev M., Fan T.-S., Saraga D., Eleftheriadis K.* Small-scale study of Siberian biomass burning: I. Smoke microstructure // *Aerosol and Air Quality Research*. 2015. V. 15. P. 117–128. doi: 10.4209/aaqr.2014.09.0206.
- Popovicheva O.B., Volpert E., Sitnikov N.M., Chichaeva M.A., Padoan S.* Black carbon in spring aerosols of Moscow urban background // *Geography, Environment, Sustainability*. 2020. V. 13. P. 233–243. doi:10.24057/2071-9388-2019-90.
- Rose C., Collaud Coen M., Andrews E., Lin Y., Bossert I., Lund Myhre C., Tuch T., Wiedensohler A., Fiebig M., Aalto P.* Seasonality of the particle number concentration and size distribution: a global analysis retrieved from the network of Global Atmosphere Watch (GAW) near-surface observatories // *Atmospheric Chemical Physics*. 2021. V.21. P.17185–17223. doi:10.5194/acp-21-17185-2021.
- Sandradewi J., Prévôt A.S.H., Szidat S., Perron N., Alfarra M.R., Lanz V.A., Weingartner E., Baltensperger U.* Using aerosol light absorption measurements for the quantitative determination of wood burning and traffic emission contributions to particulate matter // *Environmental Science and Technology*. 2008. V. 42. P. 3316–3323. doi:10.1021/es702253m
- Savadkoohi M., Pandolfi M., Reche C., Niemi J.V., Mooibroek D., Titos G., Green D.C., Tremper A.H., Hueglin C., Liakakou E.* The variability of mass concentrations and source apportionment analysis of equivalent black carbon across urban Europe // *Environment international*. 2023. V. 178. P. 25. doi:10.1016/j.envint.2023.108081.
- Schmale J., Arnold S., Law K.S., Thorp T., Anenberg S., Simpson W., Mao J., Pratt K.* Local Arctic air pollution: A neglected but serious problem // *Earth's Future*. 2018. V. 6. P. 1385–1412. doi:10.1029/2018EF000952.
- Schneider E., Czech H., Popovicheva O., Chichaeva M., Koblelev V., Kasimov N., Minkina T., Rüger C.P., Zimmermann R.* Mass spectrometric analysis of unprecedented high levels of carbonaceous aerosol particles long-range transported from wildfires in the Siberian Arctic // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2024. V. 24. P. 553–576. doi:10.5194/acp-24-553-2024.
- Stein A., Draxler R., Rolph G., Stunder B., Cohen M., Ngan F.* NOAA's Hysplit atmospheric transport and dispersion modeling system // *B. Am. Meteorol. Soc.*, 2015. V. 96. P. 2059–2077. doi:10.1175/BAMS-D-14-00110.1.
- Trechera P., Garcia-Marlès M., Liu X., Reche C., Pérez N., Savadkoohi M., Beddows D., Salma I., Vörösmarty M., Casans A.* Phenomenology of ultrafine particle concentrations and size distribution across urban Europe // *Environment international*. 2023. V. 172. P. 32. doi:10.1016/j.envint.2023.107744.
- Uria–Tellaetxe I., Carslaw D.C.* Conditional bivariate probability function for source identification // *Environmental modelling & software*. 2014. V. 59. P. 1–9. doi:10.1016/j.envsoft.2014.05.002.
- Vratolis S., Gini M., Bezantakos S., Stavroulas I., Kalivitis N., Kostenidou E., Louvaris E., Siakavaras D., Biskos G., Mihalopoulos N.* Particle number size distribution statistics at City-Centre Urban Background, urban background, and remote stations in Greece during summer // *Atmospheric environment*. 2019. V. 213. P. 711–726. doi:10.1016/j.atmosenv.2019.05.064
- Zhang K.M., Allen G., Yang B., Chen G., Gu J., Schwab J., Felton D., Rattigan O.* Joint measurements of PM_{2.5} and light-absorptive PM in woodsmoke-dominated ambient and plume environments // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2017. V. 17. P. 11441–11452. doi:10.5194/acp-17-11441-2017.
- <http://www.arl.noaa.gov/ready>
- <https://aviales.ru/>
- <https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/map>
- <https://geonovosti.terratech.ru/economy/razvitie-neft-egazovykh-mestorozhdeniy-na-primere-urengoy-skogo-mestorozhdeniya/>
- <https://viirs.skytruth.org/apps/heatmap/>
- <https://worldview.earthdata.nasa.gov/>
- <https://www.geogr.msu.ru/science/projects/IAC/>

IMPACT OF FOSSIL FUEL COMBUSTION EMISSIONS AND WILDFIRES ON AIR QUALITY OF URBAN ENVIRONMENT IN WESTERN SIBERIAN INDUSTRIAL CITY

**D. A. Khoziainova¹, O. B. Popovicheva^{2,*}, M. A. Chichaeva¹,
R. G. Kovach¹, V. Yu. Slobodyan³, N. S. Kasimov¹**

*¹Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University,
Leninskie Gory 1, 119991, Moscow, Russian Federation*

*²Skobeltsyn Institute Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University,
Leninskie Gory 1, 119991, Moscow, Russian Federation*

*³JSC Institute of Environmental Survey, Planning and Assessment,
Leninskie Gory 1, 119234, Moscow, Russian Federation*

**e-mail: olga.popovicheva@gmail.com*

Assessment of air quality in the industrial cities is of the high attention, especially in the regions sensitive to the ecological and climate changes. Study of atmospheric aerosol loading carried out in the Novy Urengoy city during summer- autumn of 2023. Particle number concentration, mass concentration of particle with a size less than 10 μm (PM_{10}) and 2.5 μm ($\text{PM}_{2.5}$) as well as black carbon (BC) measured by the mobile Aerosol Complex. The portion of fossil fuel combustion FF% and biomass burning (BB%) estimated using the aethalometer model. BC concentrations increased during pollution episodes recorded at the end of June (I) and July (II), in the beginning of August (III) and September (IV), doubled on average in comparison with the level of urban emissions. During the episode IV of maximum pollution BC concentration and its impact to $\text{PM}_{2.5}$ increased 4 and 5 times, respectively. At that time, portion of fossil fuel combustion FF% approached 96%. Cluster analyses of BC dependence on the wind speed and direction revealed the sector of high concentration source. FF% indicated the direction of the emissions from the biggest industrial enterprise of Urengoy oil and gas condensate field. Wildfire plume identified by BB% from the south of Siberia.

Keywords: air quality, urban emissions, combustion, black carbon