

ОПТИКА КЛАСТЕРОВ, АЭРОЗОЛЕЙ И ГИДРОЗОЛЕЙ

УДК 551.556

## Черный углерод городских эмиссий в Арктическом регионе по данным вблизи г. Салехарда

О.Б. Поповичева<sup>1</sup>, В.О. Кобелев<sup>2</sup>, А.И. Синицкий<sup>2</sup>, Н.М. Ситников<sup>3</sup>,  
М.А. Чичаева<sup>4</sup>, А. Хансен<sup>5\*</sup>

<sup>1</sup>НИИ ядерной физики им. Д.В. Скобельцына  
119234, г. Москва, Ленинские горы, 1, стр. 2

<sup>2</sup>Научный центр изучения Арктики  
629008, г. Салехард, ул. Республики, 20

<sup>3</sup>Центральная аэрологическая обсерватория  
141700, Московская обл., г. Долгопрудный, ул. Первомайская, 3

<sup>4</sup>Географический факультет Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова  
119991, г. Москва, Ленинские горы, 1

<sup>5</sup>Magee Scientific  
1916A M.L. King Jr. Way, Berkeley, CA 94704, USA

Поступила в редакцию 21.01.2020 г.

Исследованы городские эмиссии черного углерода (BC) как наиболее значимой компоненты загрязненной атмосферы Арктического региона. С помощью семиволнового аэлометра AE33 проведены трехмесячные непрерывные измерения массовых концентраций BC на аэрозольном комплексе, установленном вблизи г. Салехарда. Потенциальные источники эмиссий идентифицированы по результатам расчетов двумерной функции вероятности попадания концентрации BC в заданный диапазон значений при определенных направлениях и скоростях ветра. По значениям концентраций BC в диапазоне от 73 до 135 нг/м<sup>3</sup> к северо-западу от комплекса определен сектор выноса городских эмиссий, среди источников которых по официальным данным доминируют транспорт и теплоэнергетический комплекс, использующие дизельное топливо, бензин и природный газ. В апреле – мае и июне средние концентрации BC в секторе выноса городских эмиссий составили 133 ± 80 и 105 ± 80 нг/м<sup>3</sup>, а в июле, в период интенсивных лесных пожаров, они достигли 350 ± 120 нг/м<sup>3</sup>, что позволило определить вклад дымовых шлейфов в загрязнение атмосферы города и ухудшение качества воздуха городской среды.

**Ключевые слова:** городские эмиссии, черный углерод, Арктический регион, пожары; urban emissions, black carbon, Arctic region, wildfires.

### Введение

Научные исследования глобальных процессов окружающей среды в Арктическом регионе – наиболее чувствительном к быстрым климатическим изменениям – особенно важны в настоящее время. Среди основных климатически активных аэрозольных компонентов атмосферы выделяется продукт горения природных топлив и биомасс – черный углерод (black carbon, BC), хорошо поглощающий солнечное излучение [1]. Его вклад в повышение температуры в Арктике, наблюдаемое с 1976 по 2007 г., составляет 1,09 ± 0,81 °C [2]. Осаждение черного углерода на снег вызывает уменьшение альbedo подстилающей поверхности и, следовательно, ускорение таяния снега и льда [3].

Черный углерод эмитируется в мелкодисперсной вдыхаемой фракции аэрозолей и влияет на здоровье людей, вызывая ряд хронических легочных заболеваний [4]. Уровень загрязнения воздуха в Арктическом регионе, вызванный местными источниками выбросов продуктов сжигания, может значительно превышать стандарты качества воздуха, ухудшать состояние здоровья населения и экосистемы в целом [5]. Анализ аэрозольного состава атмосферы наиболее актуален для северных районов России, где наиболее токсичные [6] дизельные эмиссии транспортных систем определяют высокую степень загрязнения воздуха [7].

Исследования многолетних изменений арктического климата демонстрируют значительное влияние эмиссий черного углерода на состояние атмосферы Арктики. Зимой вследствие комбинации интенсивного дальнего переноса продуктов хозяйственной деятельности и температурной инверсии наблюдается арктическая дымка [3]. Весной при увеличении солнечной активности устойчивость атмосферы уменьшается, концентрация BC падает, влияние локальных антропогенных источников становится более значи-

\* Ольга Борисовна Поповичева (olga.popovicheva@gmail.com); Василий Олегович Кобелев (dfcz2007@mail.ru); Антон Иванович Синицкий (geolosoph@gmail.com); Николай Михайлович Ситников (sitnikovnm@mail.ru); Мария Александровна Чичаева (shamora777@yandex.ru); Антони Хансен (tony.hansen@mageescientific.com).

тельным, что определяет важность количественного анализа эмиссий загрязняющих веществ в прибрежных районах Арктики [8]. Длительные измерения черного углерода в континентальной части Российской Арктики на побережье моря Лаптевых [9, 10] подтвердили значительное воздействие на степень загрязнения атмосферы как дальнего переноса загрязнений, так и локальных источников в жилом секторе.

В настоящее время на российские территории выше 60° с.ш. приходится более 50% общемировой эмиссии черного углерода [11, 12]; среди источников доминируют горение биомассы в Сибири [12] и сжигание дизельного топлива стационарными источниками и транспортными системами [13]. Весной и летом в прибрежных районах Арктики регистрируются шлейфы природных пожаров, в которых наблюдаются высокие (до 1,5 мкг/м<sup>3</sup>) концентрации ВС по сравнению с минимальными (~20 нг/м<sup>3</sup>) в удаленных районах [14, 15]. В периоды воздействия шлейфов природных пожаров наблюдалось значительное ухудшение качества воздуха в городской среде [16, 17]. Для этих сезонов была рассчитана важнейшая характеристика сибирских пожаров – индекс эмиссии черного углерода ( $-0,52 \pm 0,07$  г ВС кг<sup>-1</sup>) [15].

С оценками индексов антропогенных эмиссий ВС в Арктическом регионе ситуация значительно более неопределенная. На основе базы данных антропогенных эмиссий ECLIPSE 4.0 и расчетов модели FLEXPART получены среднегодовые концентрации ВС в северных районах Сибири (в Ненецком, Ямало-Ненецком (ЯНАО) и Ханты-Мансийском округах), которые варьируются в диапазоне 100–500 нг/м<sup>3</sup> [8]. Показано, что среди основных категорий эмиссий доминируют индустриальное сжигание попутного газа нефте- и газодобывающим топливно-энергетическим комплексом (ТЭК) и жилой сектор, вклады которых составляют 70–80 и 5–10% всех эмиссий соответственно. Вынос загрязнений из северных индустриальных районов в арктические моря приводит к возрастанию концентраций ВС до 400 нг/м<sup>3</sup> в сравнении с уровнем в несколько нг/м<sup>3</sup> при направлении ветра с океана [8, 18].

Наиболее развитая на сегодня база данных российских эмиссий BCRUS учитывает спутниковые данные по наземному свечению, инвентаризацию дорожного транспорта, современные технологии сжигания и количество потребляемого топлива [19]. Модельные оценки в районах российского севера, проведенные на базе траекторной модели HYSPLIT и BCRUS, указывают на регион ЯНАО как на один из доминирующих по степени загрязнения окружающей среды черным углеродом [20]. Однако в силу отсутствия локальных данных о концентрациях ВС в городах индексы эмиссий жилого сектора в базе BCRUS адаптировались на основе измеряемых в других странах с подобным уровнем жизни. Из-за отсутствия официального реестра индустриальных и городских эмиссий и систематических измерений черного углерода все самые современные модели оценивают пространственное распределение концентраций ВС и уровень эмиссий городов лишь по порядку величины [5, 19, 20].

Единственная в настоящее время инвентаризация городских источников черного углерода, проведенная за полярным кругом, в г. Мурманске, основывается на разработанной методологии оценок индексов эмиссий автомобильного и внедорожного транспорта, судов и дизель-генераторов, использующих дизельное топливо [21]. Оценки городских эмиссий дали суммарные выбросы ВС порядка 400 тыс. т за год [6], однако эта оценка не подтверждена натурными измерениями.

Салехард находится на полярном круге и представляет собой типичный город севера России, не являющийся индустриальным центром. Население Салехарда составляет 50 тыс. чел. На его территории нет крупных промышленных предприятий, которые могли бы дать весомый вклад в выбросы ВС в атмосферу. При этом, находясь в регионе ЯНАО, Салехард оказывается на пути выноса крупномасштабных эмиссий в Арктику [8]. Цель настоящей работы – определение эмиссий черного углерода в Салехарде в натурных измерениях. Эти данные важны как для оценки качества воздуха типичного города севера России, так и для количественных оценок вклада городов в инвентаризацию выбросов в Арктическом регионе.

## 1. Методы измерений и оценок

В апреле 2019 г. в 4 км от центра и в ~1 км от восточной окраины Салехарда (66°30' с.ш., 66°38' в.д.) был создан измерительный аэрозольный комплекс (ИАК) «Обдорск» (рис. 1). На втором этаже павильона был установлен аэталометр AE33 (Magee Scientific), забор воздуха осуществлялся снаружи устройством, предохраняющим последний от попадания воды. Работа AE33 основана на непрерывном отборе аэрозолей из атмосферы при различных скоростях потока воздуха и одновременном измерении ослабления излучения, проходящего через два фильтра, а также через референс-фильтр без прокачки воздуха [22]. Такой метод позволяет учесть нелинейность поглощения с увеличением нагрузки, возникающую при накоплении частиц на фильтре. Аэталометр AE33 обеспечивает измерение поглощения осажденными на фильтре частицами излучения на семи длинах волн в диапазоне от ультрафиолетового (370 нм) до инфракрасного (950 нм). Массовая концентрация черного углерода  $BC_{880}$  определяется по изменению ослабления излучения в инфракрасном диапазоне на  $\lambda = 880$  нм с массовым коэффициентом поглощения 7,7 м<sup>2</sup>/г. Именно в этом диапазоне хорошо поглощают продукты сжигания природного ископаемого топлива, в то время как органическая и минеральная аэрозольные составляющие – значительно меньше [23]. При сжигании древесины и в дымах лесных пожаров значительно увеличивается поглощение на коротких длинах волн [24], которое определяет массовую концентрацию  $BC_{470}$  на  $\lambda = 470$  нм. Разница между  $BC_{880}$  и  $BC_{470}$  служит маркерной оценкой вклада горения биомассы по сравнению со сжиганием природного топлива [25]. В настоящей работе значительная

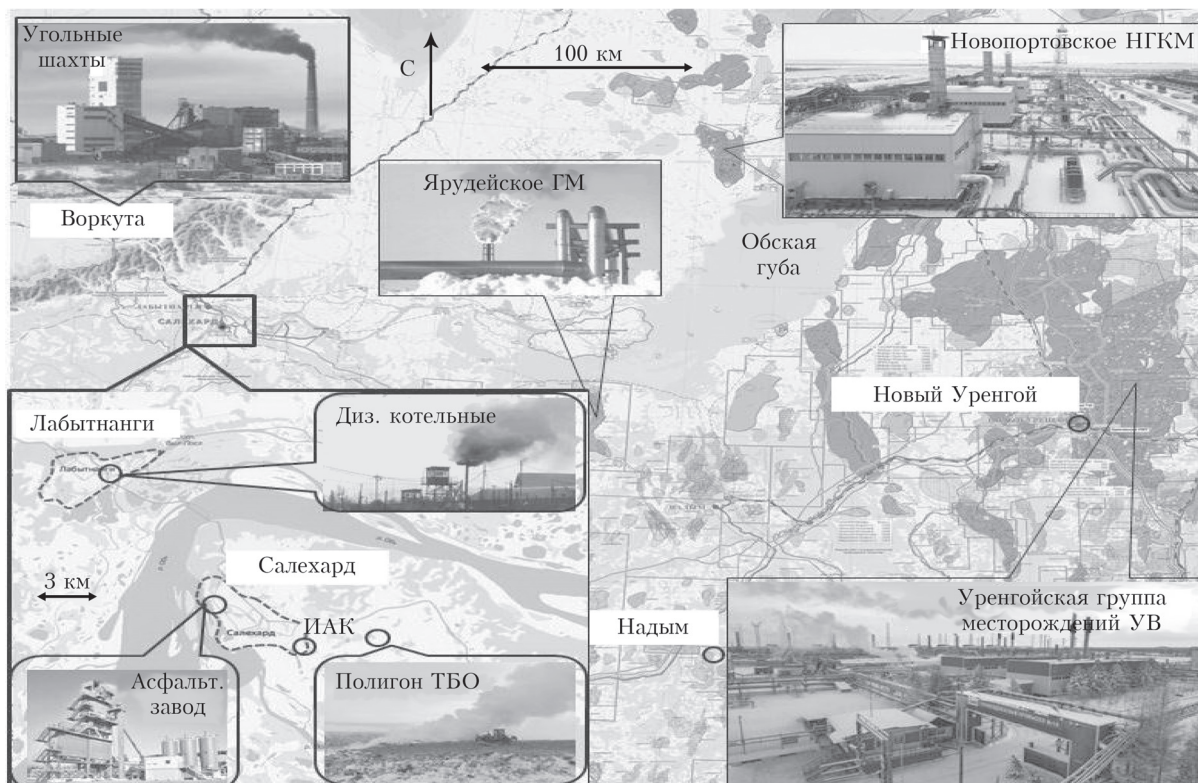


Рис. 1. Карта региона ЯНАО с крупнейшими нефте- и газодобывающими предприятиями. На вставке слева – Салехард, Лабитнанги и их окрестности; указано месторасположение измерительного аэрозольного комплекса и объектов хозяйственной деятельности

разница между измеренными концентрациями ( $BC_{470} - BC_{880}$ ) показывает вклад дымовых эмиссий по сравнению с городскими эмиссиями транспорта и ТЭК. Одновременно с измерениями аэрометром проводился сбор метеоданных (температура, направление и скорость ветра) с метеостанции ФГБУ «Гидрометцентр России» (<http://www.meteoinfo.ru/archive-pogoda/russia/moscow>), находящейся на расстоянии 5 км от измерительного комплекса.

Для идентификации источников загрязнений широко используется метод определения направления выноса загрязнений [26]. В настоящей работе он применен на основе анализа данных одновременных измерений концентраций ВС, направления и скорости ветра в приближении «локального источника», действующего при удалении на 1–10 км [27]. Рассчитывается двумерная функция вероятности (Conditional probability function, CPF) попадания концентрации ВС в заданный диапазон значений при определенных направлениях и скоростях ветра по методу, описанному в [28]. Функция CPF определяется как отношение числа случаев регистрации концентрации ВС в некотором заданном диапазоне значений  $n_{\theta, j}$  к числу  $m_{\theta, j}$  всех измеренных концентраций ВС при определенном направлении  $\theta$  и скорости  $j$  ветра:

$$CPF = \frac{n_{\theta, j}}{m_{\theta, j}}$$

Высокие значения CPF идентифицируют направление нахождения источника эмиссий с концентрациями в заданном диапазоне измеряемых величин. Поскольку различные источники, в зависимости от месторасположения и интенсивности эмиссий, идентифицируются в разных диапазонах концентраций [28], весь диапазон измеренных концентраций делится на интервалы, в которых определяются направления потенциальных источников. С помощью этого метода можно идентифицировать и удаленные источники в случае, если в период измерений не происходило значительных изменений атмосферных фронтов [28].

Для определения направления прихода воздушных масс в период выноса городских эмиссий в точку наблюдения рассчитаны обратные траектории переноса воздушных масс по модели HYSPLIT с использованием архивных метеорологических данных GDAS [29] на сайте лаборатории воздушных ресурсов (<http://www.arl.noaa.gov/ready>). Проведены расчеты на высотах 50, 100, 250 и 500 м длительностью 72 ч. Обработка данных на разных высотах показала, что в указанное время воздушные массы приходили в точку наблюдения из одного и того же района исследования, что позволило далее ограничиться демонстрацией результатов расчетов для высоты 500 м.

С целью получения более детальной информации об источниках городских эмиссий и типе сжигаемого топлива был сделан запрос в Департамент городского хозяйства г. Салехарда, получены и обработаны официальные данные по выбросам систе-

мы тепло- и энергоснабжения АО «Салехардэнерго» за 2018–2019 г. и информация о транспортной инфраструктуре города. Представленные официальные данные основаны на расчетах валовых выбросов «углерода (сажи)», предполагающих индекс эмиссии углерода 1,5–3 г на килограмм топлива для разных групп стационарных дизельных установок, согласно ГОСТ Р56163-2014 «Метод расчета выбросов от стационарных дизельных установок». В расчетах эмиссий от сжигания газа применялась методика определения выбросов загрязняющих веществ в атмосферу при сжигании топлива в котлах производительностью менее 30 т пара в час.

## 2. Результаты и обсуждение

Измерения концентрации черного углерода на ИАК «Обдорск» были проведены с 19 апреля по 5 августа 2019 г. В этот интервал среднесуточная температура воздуха увеличилась с  $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$  в апреле до  $+17\text{ }^{\circ}\text{C}$  в июле. В июне, согласно ресурсу пожаров ЕКС ЯНАО ([https://karta.yanao.ru/eks/Forest\\_fires](https://karta.yanao.ru/eks/Forest_fires)), в регионе были зарегистрированы природные пожары. Поэтому далее для оценок влияния техногенных источников был выбран период до начала природных пожаров, с 19 апреля по 1 июня 2019 г. Анализ розы ветров в этот период показал преимущественное северо-западное направление ветра при скорости до 12 м/с. При больших скоростях ветра усиливалось турбулентное перемешивание слоев атмосферы, наблюдались эпизоды самых низких концентраций ВС. Малая скорость ветра и безветренная погода приводили к накоплению загрязнений в месте наблюдения.

На рис. 2 (цвет. вставка) приведены результаты расчетов двумерной функции вероятности CPFF попадания концентрации ВС в заданный интервал процентилей, которые показывают, какой процент значений находится ниже определенного уровня. В интервале самых малых процентилей, до 10%, самая высокая вероятность определяется в юго-западном направлении (на Южный Урал). Столь низкая концентрация ВС ( $1,6\text{--}30\text{ нг/м}^3$ , в среднем  $\sim 15\text{ нг/м}^3$ ) характерна для удаленных от каких-либо источников районов [10, 30] и принимается в настоящей работе как уровень арктического фона.

Источники эмиссий ВС с концентрациями в интервале процентилей 10–50% локализуются в восточном, южном и юго-западном направлениях (рис. 2). Карта расположения объектов хозяйственной деятельности (см. рис. 1) указывает на местонахождение в 3 км от ИАК в восточном направлении полигона твердых бытовых отходов (ТБО) и цементного завода. В южном и юго-западном направлениях в окрестностях Салехарда на десятки километров нет ни населенных пунктов, ни каких-либо промышленных предприятий. Однако в том же направлении на расстоянии  $\sim 300$  км находится самый большой нефтедобывающий район Ханты-Мансийского автономного округа. Вероятно, ИАК регистрирует шлейф крупномасштабных эмиссий центральной и южной частей крупнейшей в мире западно-сибирской нефтеносной провинции. Подобная ситуация обнаружения удаленного источника методом CPFF может наблюдаться

в случае отсутствия резких границ атмосферных фронтов, изменяющих направление ветров, как описано в [28]. Более слабый потенциальный источник ВС с более низкой вероятностью определяется в северо-западном направлении, где в 360 км расположено Новопокровское нефтегазоконденсатное месторождение (НГКМ) (см. рис. 1).

Мощный источник эмиссий, с концентрациями в интервале больших процентилей (50–80%), располагается на северо-западе ИАК, в направлении Салехарда и Лабитнанги, находящегося на другом берегу р. Оби. Наибольшая вероятность (от 0,1 до 0,3) попадания концентраций ВС в диапазон  $73\text{--}135\text{ нг/м}^3$  регистрируется в секторе направлений ветра  $280\text{--}340^{\circ}$  (см. рис. 2), который далее определяется как сектор выноса городских эмиссий. Расчет обратных траекторий переноса воздушных масс показал, что в период, когда направление ветра регистрировалось из сектора выноса городских эмиссий, все дальние переносы в точку наблюдений проходили через город из того же сектора (рис. 3).

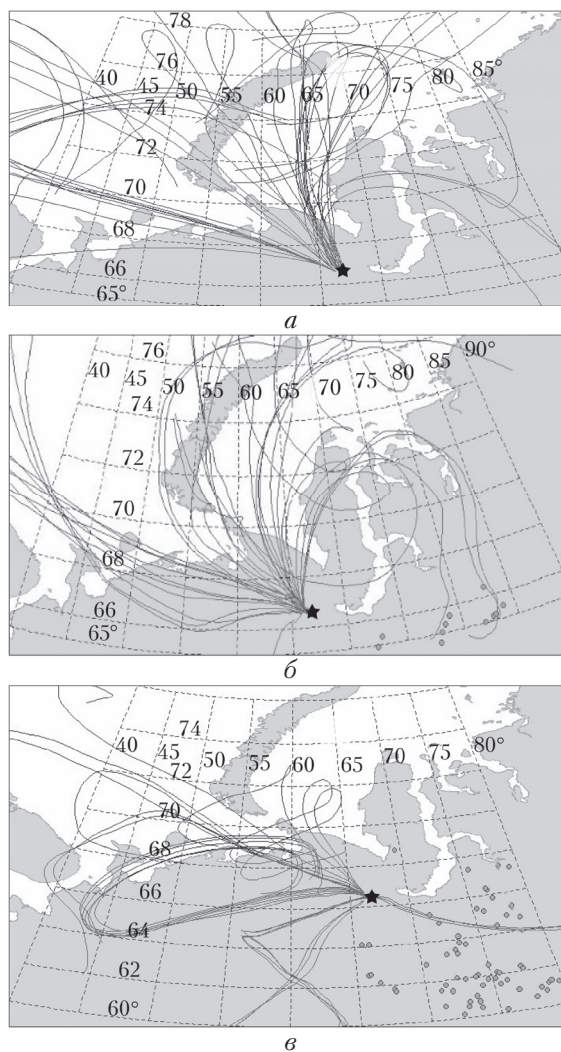


Рис. 3. Траектории воздушных масс, приходящих на ИАК в период выноса городских эмиссий ВС в секторе направлений ветра  $280\text{--}340^{\circ}$ : а – апрель–май; б – июнь; в – июль 2019 г.; кружками отмечены области пожаров по ресурсу ЕКС ЯНАО

Самый мощный источник эмиссий, с концентрациями в интервале процентилей 80–100%, определяется с максимальной вероятностью ~0,8 на северо-востоке от ИАК. Карта объектов хозяйственной деятельности на рис. 1 указывает на расположение на расстоянии более 300 км от г. Салехарда крупнейших в ЯНАО месторождений углеводородов (Уренгойское, Ярудейское, Новопортовское). Центр города является источником самых высоких (до 424 нг/м<sup>3</sup>) концентраций ВС, регистрируемых с вероятностью 0,4 на северо-востоке.

Результаты измерений массовых концентраций черного углерода на ИАК «Обдорск» в секторе выноса эмиссий Салехарда представлены на рис. 4. Таблица обобщает статистику за весь период измерений в выборке сектора городских эмиссий для средней, минимальной и максимальной концентраций ВС. В апреле – мае концентрация ВС<sub>880</sub> варьировалась от 1,6 до 424 нг/м<sup>3</sup>, периодически превышая арктический фон более чем в 15 раз, в эпизодах при малой скорости ветра. В некоторых эпизодах в апреле – мае, преимущественно при высоких концентрациях, наблюдалось увеличенное поглощение на  $\lambda = 470$  нм, приводившее к увеличению разности ВС<sub>470</sub> и ВС<sub>880</sub>, обусловленное сжига-

нием биомассы в жилом секторе и угля на угольных котельных г. Лабытнанги. Отметим, что такое превышение отсутствует в эмиссиях дизельных двигателей, генераторов и установок, использующих дизельное топливо [24]. Разница между ВС<sub>880</sub> и ВС<sub>470</sub>, указывающая на вклад сжигания биомассы и угля, достигла 80 нг/м<sup>3</sup> 1 мая и 77 нг/м<sup>3</sup> 6 мая. В среднем концентрация ВС в городских эмиссиях составила  $133 \pm 80$  нг/м<sup>3</sup>. Для сравнения: среднемесячные концентрации ВС в Томске (Западная Сибирь) с населением в ~10 раз больше, чем в Салехарде, в весенний (апрель – май) период составляют ~700 нг/м<sup>3</sup>, что более чем в 5 раз выше уровня загрязнений черным углеродом атмосферы Салехарда [31]. Концентрация ВС на фоновой станции в 70 км от г. Томска в тот же период ~400 нг/м<sup>3</sup>.

По официальным данным, основным городским источником эмиссий продуктов сжигания природного топлива (газа и дизельного топлива) в Салехарде является теплоэнергетическая система. В настоящее время на балансе АО «Салехардэнерго» находится 36 отопительных котельных и 3 центральных тепловых пункта. Основной вид топлива для котельных – природный газ с минимальной теплотой сгорания 7987 ккал/м<sup>3</sup>. Суммарный валовый

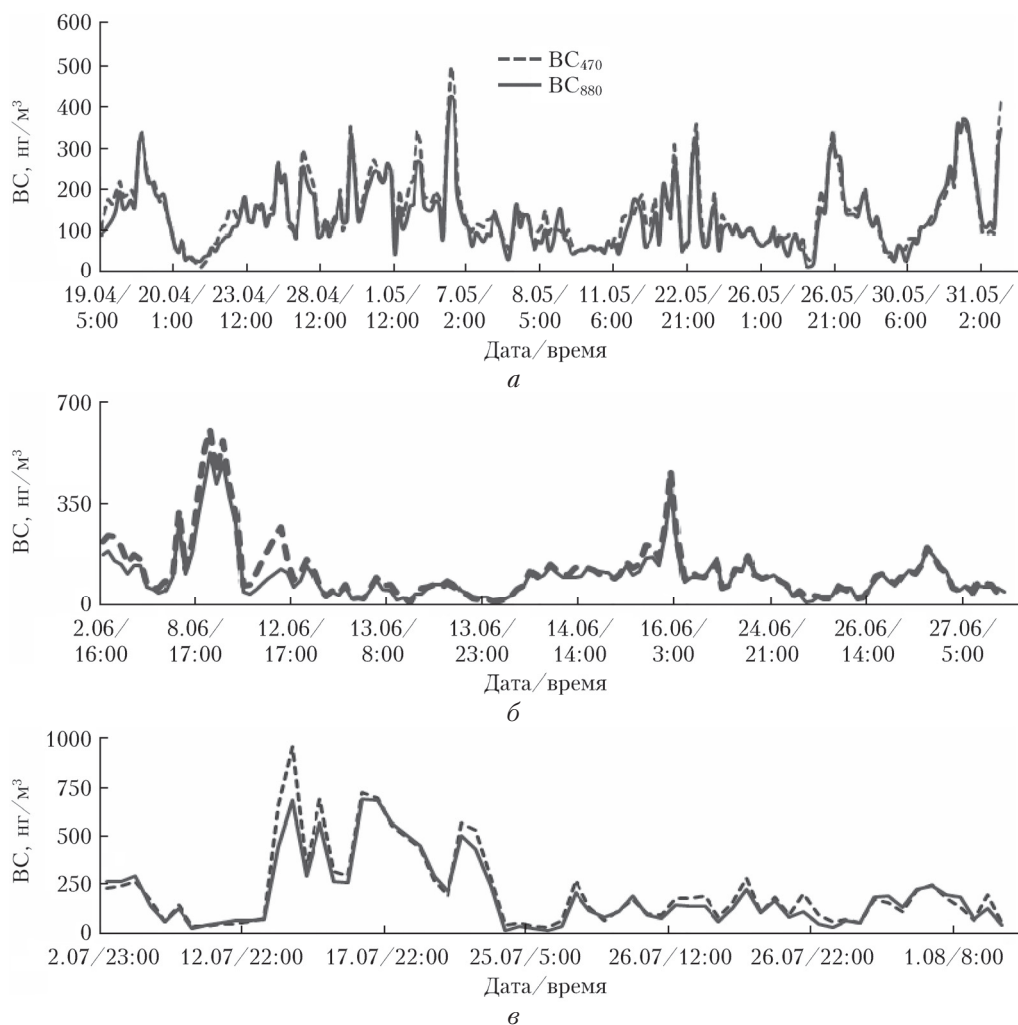


Рис. 4. Среднечасовые массовые концентрации ВС в эпизодах выноса из сектора городских эмиссий г. Салехарда

Средняя, минимальная (min), максимальная (max) концентрации ВС, среднеквадратичная ошибка ( $\sigma$ ) и количество данных в выборке сектора городских эмиссий ( $N$ ) за указанный период измерений на ИАК «Обдорск»

Период измерений	Концентрация ВС			$\sigma$	$N$
	средняя	min	max		
19.04–31.05	134	12	424	62	247
01.06–31.06	102	3	526	54	166
01.07–31.07	204	9	689	150	65

выброс углерода (сажи) в 2018 г. равен 5,874 тыс. т. Выбросы углерода (сажи) от объектов, работающих на газу, суммарно составили 0,065 тыс. т (всего 1,2% от общих выбросов), а на дизельном топливе (две дизельные электростанции, один аварийный дизель-генератор, автотранспортный цех) – 5,808 тыс. т (98,8% от общих выбросов). С сентября 2018 г. Салехардский энергоузел присоединен к электрическому сетям АО «Тюменьэнерго» (ЕЭС России), а электростанции ДЭС-1 и ДЭС-2 выведены из эксплуатации. Среди наиболее значительных источников эмиссий остались зоны г. Лабытнанги и пос. Харц, котельные на территории которых работают на угле и мазуте, а также асфальтовый завод в северной части Салехарда.

Весомый вклад в загрязнение атмосферы Салехарда вносит автомобильный транспорт, выбросы загрязняющих веществ которого за 2018 г. равны 0,395 тыс. т. Дизельное топливо и бензин – основные виды топлива, используемые для автомобильных перевозок, а также для обслуживания пассажирских и транспортных водных путей по р. Оби и Обской губе. По данным ОГИБДД УМВД, автомобильный парк Салехарда насчитывает 18191 транспортное средство (86% – легковые автомобили, остальное – автобусы и грузовой дизельный транспорт).

В июне на ИАК «Обдорск» концентрация ВС в секторе выноса эмиссий г. Салехарда в среднем составила  $105 \pm 80$  нг/м<sup>3</sup>, были зарегистрированы эпизоды максимальных ВС<sub>880</sub> до 526 нг/м<sup>3</sup> (см. рис. 4). Совместный анализ концентраций ВС и скорости ветра показал, что наибольшие значения ВС наблюдались в дни с низкой, порядка 1 м/с, скоростью ветра, способствующей накоплению загрязнений вблизи города. Наиболее длительный эпизод высоких концентраций черного углерода был зарегистрирован с 8 по 12 июня, когда разница между ВС<sub>880</sub> и ВС<sub>470</sub> – 78 нг/м<sup>3</sup>, а 11 июня достигла 156 нг/м<sup>3</sup>. Такое увеличение концентрации ВС на коротких длинах волн обусловлено влиянием дымовых эмиссий лесных пожаров, площадь которых в этот период, согласно ресурсу ЕКС, составляла от 0,3 до 4,2 км<sup>2</sup>. Как показывают расчеты траекторий дальнего переноса в апреле–мае 2019 г., воздушные массы, проходящие в место наблюдений с северо-востока, проходили через город (см. рис. 4). В период с 8 по 12 июня они пересекали район пожаров на северо-востоке от города.

В июле 2019 г. в северных районах Сибири наблюдались природные пожары, интенсивность которых в 100 раз превышала уровень ежегодно на-

блюдаемых пожаров (<https://atmosphere.copernicus.eu/cams-monitors-unprecedented-wildfires-arctic>). Средняя июльская концентрация ВС, измеренная в секторе выноса эмиссий Салехарда, составила  $350 \pm 120$  нг/м<sup>3</sup>. Согласно ресурсу ЕКС ЯНАО с 14 по 25 июля в ЯНАО было зарегистрировано более 40 пожаров на суммарной площади ~1000 га. Именно в этот период на ИАК были зарегистрированы продолжительные максимумы ВС<sub>880</sub> (до 690 нг/м<sup>3</sup>) и ВС<sub>470</sub> (до 958 нг/м<sup>3</sup>) (см. рис. 4). Значения ВС<sub>470</sub> превысили ВС<sub>880</sub> на рекордную величину ~264 нг/м<sup>3</sup>, идентифицирующую вклад дымовых шлейфов из районов пожаров (см. рис. 3) в полную нагрузку атмосферы города эмиссиями продуктов горения биомассы.

## Заключение

Салехард – типичный город Арктического региона, где среди источников значимой компоненты загрязненной атмосферы – черного углерода – доминируют теплоэнергетика и транспорт, использующие дизельное топливо, бензин и природный газ. На ИАК «Обдорск», установленном вблизи г. Салехарда, в апреле–августе 2019 г. был проведен цикл измерений концентрации черного углерода. На северо-западе от ИАК в направлении Салехарда в интервале больших процентилей концентраций черного углерода (от 50 до 80%) определен сектор выноса городских эмиссий, подтвержденный расчетами траекторий переноса воздушных масс. Средние концентрации ВС в городских эмиссиях в апреле–мае и июне составили 113 и 105 нг/м<sup>3</sup>. Оценки качества воздуха в городской среде показали, что в отдельных эпизодах концентрация ВС превышала арктический фон более чем в 30 раз. Во время интенсивных июльских пожаров средняя концентрация увеличилась до 350 нг/м<sup>3</sup>. Было зарегистрировано рекордное значение ~264 нг/м<sup>3</sup> маркерной оценки вклада горения биомассы по сравнению со сжиганием природного топлива, указывающее на беспрецедентно высокое для Арктического региона загрязнение атмосферы в период природных пожаров.

Авторы благодарны Администрации г. Салехарда (Департамент городского хозяйства) за предоставленную информацию о возможных источниках загрязнения за 2018–2019 гг. и Программу комплексного развития транспортной инфраструктуры муниципального образования город Салехард Ямало-Ненецкого автономного округа на 2017–2025 гг.

Работа по установке комплекса и проведение измерений выполнены при поддержке гранта РФФИ № 18-0560084, анализ результатов аэталометрических измерений – гранта РНФ № 19-773004.

1. Novakov T., Rosen H. The Black Carbon Story: Early History and New Perspectives // *Ambio*. 2013. V. 42. P. 840–851.
2. Shindell D., Faluvegi G. Climate response to regional radiative forcing during the twentieth century // *Nat. Geosci.* 2009. V. 2. P. 294–300.
3. Quinn P., Shaw G., Andrews E., Dutton E., Ruoho-Airola T., Gong S. Arctic haze: current trends and knowledge gaps // *Tellus B*. 2007. V. 59. P. 99–114.

4. Pope III C.A., Dockery D.W. Health effects of fine particulate air pollution: lines that connect // *J. Air Waste Manage. Assoc.* 2006. V. 56. P. 709–742.
5. Schmale J., Arnold S., Law K.S., Thorp T., Anenberg S., Simpson W., Mao J., Pratt K.A. Local Arctic air pollution: A neglected but serious problem // *Earth's Future*. 2018. V. 6. P. 1385–1412.
6. Steiner S., Czerwinski J., Comte P., Popovicheva O., Kireeva E., Müller L., Heeb N., Mayer A., Fink A., Rothen-Rutishauser B. Comparison of the toxicity of diesel exhaust produced by bio-and fossil diesel combustion in human lung cells in vitro // *Atmos. Environ.* 2013. V. 81. P. 380–388.
7. 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 // *Atmos. Chem. Phys.* 2015. V. 15. P. 8349–8359.
8. Stohl A., Klimont Z., Eckhardt S., Kupiainen K., Shevchenko V.P., Kopeikin V.M., Novigatsky A. Black carbon in the Arctic: the underestimated role of gas flaring and residential combustion emissions // *Atmos. Chem. Phys.* 2013. V. 13. P. 8833–8855.
9. Winiger P., Andersson A., Eckhardt S.T., Stohl A., Semiletov I.P., Dudarev O.V., Charkin A., Shakhova N., Klimont Z., Heyes C., Gustafsson O. Siberian Arctic black carbon sources constrained by model and observation // *Proc. Nat. Acad. Sci.* 2017. V. 114. P. E1054–E1061.
10. 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 // *Sci. Total Environ.* 2019. V. 655. P. 924–938.
11. Koch D., Schulz M., Kinne S., McNaughton C., Spackman J., Balkanski Y., Bauer S., Bernsten T., Bond T.C., Boucher O., Chin M., Clarke A., De Luca N., Dentener F., Diehl T., Dubovik O., Easter R., Fahey D.W., Feichter J., Fillmore D., Freitag S., Ghan S., Ginoux P., Gong S., Horowitz L., Iversen T., Kirkevåg A., Klimont Z., Kondo Y., Krol M., Li X., Müller R., Montanaro V., Moteki N., Myhre G., Penner J.E., Perkwitz J., Pitari G., Reddy S., Sahu L., Sakamoto H., Schuster G., Schwarz J.P., Seland Ø., Stier P., Takegawa N., Takemura T., Textor C., van Aardenne J.A., Zhao Y. Evaluation of black carbon estimations in global aerosol models // *Atmos. Chem. Phys.* 2009. V. 9. P. 9001–9026.
12. AMAP. The impact of black carbon on Arctic climate. Technical Report No. 4. AMAP, 2011. 74 p.
13. EPA, Report to congress on black carbon, Department of the Interior, and Related Agencies, Edito, 2012. 20 p.
14. Kozlov V.S., Panchenko M.V., Shmargunov V.P., Chernov D.G., Yaushcheva 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.
15. Paris J.-D., Stohl A., Nédélec P., Arshinov M.Y., Panchenko M., Shmargunov V., Law K.S., Belan B.D., Ciais P. Wildfire smoke in the Siberian Arctic in summer: source characterization and plume evolution from airborne measurements // *Atmos. Chem. Phys.* 2009. V. 9. P. 9315–9327.
16. Kozlov V.S., Yaushcheva E.P., Terpugova S.A., Panchenko M.V., Chernov D.G., Shmargunov V.P. Optical–microphysical properties of smoke haze from Siberian forest fires in summer 2012 // *Intern. J. Remote Sens.* 2014. V. 35. P. 5722–5741.
17. Поповичева О.В., Кустлер М., Куреева Е.Д., Персианцева Н.М., Тимофеев М.А., Шония Н.К., Конейкин В.М. Состав и микроструктура аэрозоля задымленной атмосферы г. Москвы в условиях экстремальных пожаров августа 2010 г. // *Изв. РАН. Физика атмосф. и океана*. 2017. Т. 53. С. 56–65.
18. Popovicheva O.B., Evangeliou N., Eleftheriadis K., Kalogridis A.C., Sitnikov N., Eckhardt S., Eleftheriadis K. Black Carbon sources constrained by observations in the Russian High Arctic // *Environ. Sci. Tech.* 2017. V. 51. P. 3871–3879.
19. Huang K., Fu J.S., Prikhodko V.Y., Storey J.M., Romanov A., Hodson E.L., Cresko J., Morozova I., Ignatieva Y., Cabaniss J. Russian anthropogenic black carbon: Emission reconstruction and Arctic black carbon simulation // *J. Geophys. Res.: Atmos.* 2015. V. 120. P. 11,306–333.
20. Виноградова А.А., Васильева А.В. Черный углерод в воздухе северных районов России: источники, пространственные и временные вариации // *Оптика атмосф. и океана*. 2017. Т. 30, № 6. С. 467–475; Виноградова А.А., Васильева А.В. Black carbon in air over northern regions of Russia: Sources and spatiotemporal variations // *Atmos. Ocean. Opt.* 2017. V. 30, N 6. P. 533–541.
21. Kholod N., Evans M., Gusev E., Yu S., Malyshev V., Tretyakova S., Barinov A. A methodology for calculating transport emissions in cities with limited traffic data: Case study of diesel particulates and black carbon emissions in Murmansk // *Sci. Total Environ.* 2016. V. 547. P. 305–313.
22. Drinovec L., Močnik G., Zotter P., Prévôt A., Ruckstuhl C., Coz E., Sciare T., Müller A., Wiedensohler A., Hansen A.D.A. The dual-spot Aethalometer: an improved measurement of aerosol black carbon with real-time loading compensation // *Atmos. Meas. Tech.* 2015. V. 8. P. 1965–1979.
23. Sandradewi J., Prévôt A.S., 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 // *Environ. Sci. Tech.* 2008. V. 42. P. 3316–3323.
24. Zhang K.M., Allen G., Yang B., Chen G., Gu J., Schwab J. Joint measurements of PM 2.5 and light-absorptive PM in woodsmoke-dominated ambient and plume environments // *Atmos. Chem. Phys.* 2017. V. 17. P. 11441–11452.
25. Allen G.A., Miller P.J., Rector L.J., Brauer M., Su J.G. Characterization of valley winter woodsmoke concentrations in Northern NY using highly time-resolved measurements // *Aerosol Air Qual. Res.* 2011. V. 11. P. 519–530.
26. Ранута В.Ф., Попова С.А., Макаров В.И., Ярославцева Т.В. Определение связей органического и элементного углерода по секторам выноса атмосферных примесей // *Оптика атмосф. и океана*. 2017. Т. 30, № 10. P. 878–882.
27. Carslaw D.C., Beevers S.D. Characterising and understanding emission sources using bivariate plots and k-means clustering // *Environ. Model. Software*. 2013. V. 40. P. 325–329.
28. Uria-Tellaetxe I., Carslaw D. Conditional bivariate probability function for source identification // *Environ. Model. Software*. 2014. V. 59. P. 1–9.
29. Stein A., Draxler R., Rolph G., Stunder B., Cohen M., Ngan F. NOAA's HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system // *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 2015. N. 96. P. 2059–2077.
30. Eleftheriadis K., Nyeki S., Psomiadou C., Colbeck I. Background aerosol properties in the European arctic // *Water Air Soil Pollut.* 2004. V. 4. P. 23–30.

31. *Yausheva E., Kozlov V., Panchenko M., Shmargunov V.*  
Comparison of the year-to-year and seasonal variability  
of aerosol characteristics under urban and background

conditions from measurements at the Aerosol Station  
and the Fonovaya Observatory in 2014–2018 // Proc.  
SPIE. 2019. V. 11208. P. 1120860.

*O.B. Popovicheva, V.O. Kobelev, A.I. Sinitsky, N.M. Sitnikov, M.A. Chichayeva, A. Hansen.* **Urban emissions of black carbon in the Arctic region by observations near Salekhard city.**

Urban emissions of black carbon (BC) were studied, since BC is the most air pollutant of the Arctic region. Three-months continuous measurements of BC mass concentrations were carried out in April–August 2019 at the aerosol station near the Salekhard city with an AE33 seven-wavelength aethalometer. Using a concentration probability function for BC concentrations measured under different wind speeds and direction, potential sources of emissions have been identified. In the north-west direction from the station, a sector of urban emissions was detected, where the range of BC concentrations was from 73 to 135 ng/m<sup>3</sup>. According to official data, transport and thermal power plants, which use diesel fuel, gasoline, and natural gas, are the major urban emission sources in Salekhard. In April–May and June 2019, the average BC concentrations in urban emissions were  $133 \pm 80$  and  $105 \pm 80$  ng/m<sup>3</sup>. In July, during a period of intense forest fires on the Polar Circle, they attained  $350 \pm 120$  ng/m<sup>3</sup> and identified the contribution of smoke plumes to the aerosol loading and deterioration of the urban air.



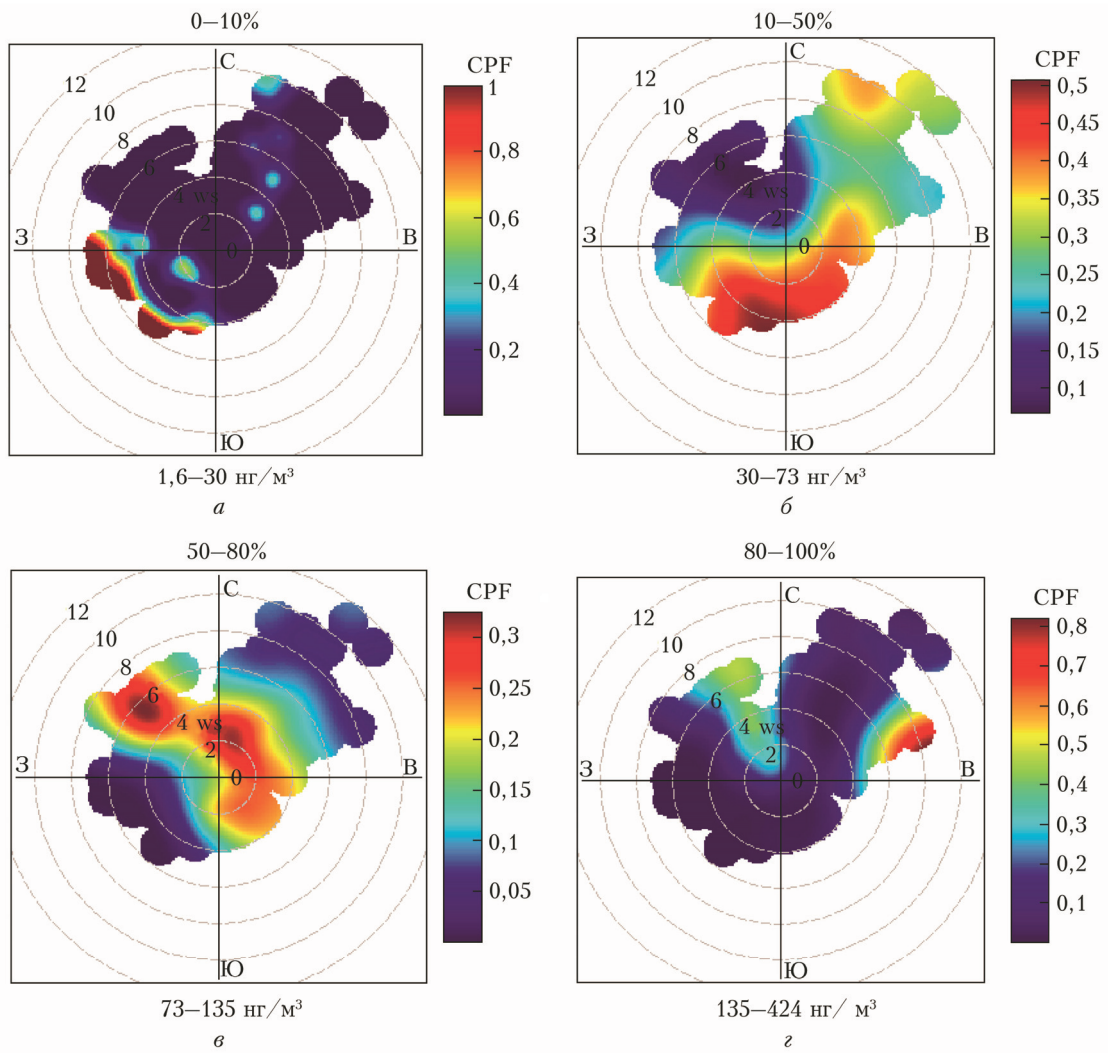


Рис. 2. Функция вероятности (CPF) попадания концентрации ВС в заданный интервал значений в полярных координатах направления и скорости ветра (ws, м/с) в апреле – мае 2019 г. Над графиками указаны рассчитываемые интервалы процентилей концентраций ВС, внизу – соответствующие диапазоны концентраций ВС