

Федеральное государственное бюджетное учреждение
«Институт глобального климата и экологии
имени академика Ю.А. Израэля»

**Доклад о прогрессе развития сети мониторинга черного
углерода в России в 2022-2023 гг. и перспективных планах**

Москва 2023

Содержание

Введение	2
Предпосылки к развитию сети мониторинга черного углерода в Арктическом регионе	4
Концепция сети мониторинга черного углерода в России	6
Географический охват сети	7
Основные методы мониторинга содержания черного углерода	10
Методы мониторинга содержания черного углерода в России	12
Определение преобладающего источника черного углерода	23
Перспективы развития сети мониторинга черного углерода в России	26
Заключение	30
Источники	31

Введение

Выбросы углеродсодержащих аэрозолей, в частности черного углерода, в атмосферу являются серьезной общемировой проблемой, так как оказывают значительное влияние на увеличение среднегодовой температуры [1]. Углеродсодержащие частицы не взаимодействуют с кислородом воздуха, не вступают в химические реакции и могут быть удалены только физически.

Черный углерод (ЧУ) представляет собой твердые частицы, размером 2,5 мкм и менее, состоящие преимущественно из чистого углерода, образующиеся в результате неполного сгорания ископаемого топлива, биотоплива и биомассы и характеризующиеся воздействием на климатическую систему за счет высокого коэффициента поглощения солнечной радиации как в атмосфере, так и за счет изменения альбедо снега и льда.

Исследование черного углерода, как агента, способствующего изменению климата, является относительно новой областью научных исследований. Содержание частиц черного углерода в атмосферном аэрозоле на отдаленных территориях [2,3] и их вклад в арктическую дымку, а также влияние черного углерода на альбедо снега [4-6] наблюдались уже в 1980-х годах.

Следует, однако, отметить, что широкое распространение и актуальность исследований черного углерода и его физико-химических свойств, в том числе его способности уменьшения альбедо снега, получили только после того, как Джейкобсон [7] и Хансен с соавторами [8] показали, что черный может нагревать атмосферу примерно на треть сильнее, чем углекислый газ, а первый крупный количественный и всеобъемлющий анализ выбросов черного углерода был проведен в 2013 году [9] на основе четырехлетнего исследования, проведенного Международным глобальным атмосферным проектом по химии (IGAC).

В силу своих оптических свойств углеродсодержащие аэрозоли способны поглощать солнечную радиацию во всех длинах волн, что в свою очередь приводит к прогреву атмосферы [10] за счет потепления тропосферного столба, а также ускорению таяния снежного покрова. Последнее особенно актуально для арктических регионов России, в которых сосредоточены промышленные

производства, а также для регионов, в которых преобладает печное отопление домовых хозяйств, поскольку при загрязнении черным углеродом поглощение солнечной радиации льдом и снежным покровом увеличивается в 1.5-5 раз [11].

Ввиду малого размера частиц ($PM \leq 2,5$ мкм в аэродинамическом диаметре), углеродсодержащие аэрозоли могут также оказывать негативное влияние на здоровье людей, поскольку их компоненты углеродсодержащих аэрозолей могут попадать в организм человека через легкие в процессе дыхания, через желудочно-кишечный тракт с водой и пищей, а также через кожу и слизистые оболочки. Кратковременное и долговременное воздействие взвешенных частиц приводит к возникновению респираторных и сердечно-сосудистых заболеваний [10].

На основании Директивы Европейского союза о качестве воздуха государства-члены ЕС должны регулировать процедуры отбора и анализа проб мелких твердых частиц ($PM_{2.5}$). Для станций в сельской местности необходимо также сообщать, какое количество частиц черного углерода содержится в проанализированных пробах, поскольку измерения содержания черного углерода в воздухе включены в качестве обязательных в программу наблюдений ЕМЕП [12]. Отметим, однако, что, в целом, в общеевропейских базах данных информация об измерениях черного углерода отсутствует.

В общем доступе представлены данные измерений для станций, расположенных в Финляндии (две), Германии (восемь), Ирландии (две) и по одной на Мальте, в Нидерландах и Польше. С 2012 года в Великобритании действует сеть мониторинга черного углерода, охватывающая не только сельские, но также городские территории и территории вблизи автомагистралей [13].

Предпосылки к развитию сети мониторинга черного углерода в Арктическом регионе

Арктика является одним из регионов, где программам по снижению выбросов чёрного углерода уделяется большое внимание. Негативное влияние чёрного углерода подразделяют на медицинский, влияние на здоровье населения Арктики (заболевания лёгких и сердечно-сосудистые заболевания), и климатический (изменение альbedo льда и снега и ускорение их таяния). Как было указано выше, к основным источникам эмиссии черного углерода относят горение ископаемого топлива, биотоплива и биомассы.

Согласно текущим оценкам, 12–15 % общего осаждения чёрного углерода в Арктике происходит от пожаров в бореальных лесах Сибири, Канады и Аляски. Количество ЧУ, образующихся при факельном сжигании, зависит от ряда физических и химических факторов. Образование чёрного углерода при сжигании попутного нефтяного газа (ПНГ) оценивается в весьма широких пределах, от $2 \cdot 10^{-4}$ до $1 \cdot 10^{-3}$ г ЧУ на 1 кг сжигаемого ПНГ [14]. Опираясь на этот показатель, можно сделать вывод, что сжигание в Арктике ПНГ даёт около 1,6 % ЧУ от всех сжигаемых здесь видов топлива. Кроме того, в увеличение эмиссии черного углерода вносят свой вклад домовые хозяйства и транспорт: основными источниками чёрного углерода в Мурманской области, являются транспорт с дизельными двигателями (особенно карьерный) и объекты ЖКХ, использующие для отопления уголь и мазут (в Мурманской области насчитывается более 130 котельных, большая часть которых работает на мазуте).

В целях снижения выбросов черного углерода с 2015 года в составе Арктического совета создана экспертная группа по черному углероду (саже) и метану. Целью экспертной группы является оценка прогресса в реализации Рамочной программы действий Арктического совета в отношении черного углерода и метана, а также информирование стран-участников и стран-наблюдателей Арктического совета.

В мае 2017 г. Арктический совет поставил задачу ограничить выбросы черного углерода на 25-33% по сравнению с уровнем 2013 г. к 2030 году. В 2021

году принято решение о выделении дополнительных бюджетных ассигнований на обеспечение российского участия в деятельности группы Арктического совета по черному углероду (саже) и метану. В соответствии с Распоряжением Правительства РФ 19.09.2022 г. № 2700-р Росгидромет является головной организацией по участию в деятельности Экспертной группы.

В этой связи, в России в настоящее время в рамках оперативно-производственных работ Росгидромета по обеспечению российского участия в деятельности группы Арктического совета по черному углероду (саже) и метану ведутся мероприятия по созданию сети мониторинга выбросов черного углерода, которая позволит не только получить информацию о количестве углеродсодержащих аэрозолей в атмосферном воздухе, атмосферных осадках, а также в снежном покрове, их влиянии на климат, но и разработать стратегию по снижению выбросов углеродсодержащих аэрозолей [15].

Подбор высокоточных методов отбора и анализа углеродсодержащих соединений (сажи и черного углерода), определение современных уровней загрязнения этим канцерогенным веществом атмосферы и других природных сред в различных районах России, идентификация источников загрязнителей и оценка их вкладов в загрязнение являются важной задачей природоохранных ведомств, основой для управления экологическими рисками, связанными со снижением качества окружающей среды.

Наблюдения за массовым содержанием черного углерода и их результаты должны способствовать установлению связей между составом атмосферы, уровнями концентраций загрязняющих веществ и изменением климата.

Концепция сети мониторинга черного углерода в России

Сеть мониторинга содержания черного углерода в приземном слое атмосферного воздуха, осадках и снежном покрове должна обеспечить:

1. Постоянный долгосрочный мониторинг концентраций черного углерода в атмосферном воздухе, атмосферных осадках, а также в снежном покрове.
2. Широкий географический охват: к 2029-му году планируется открыть не менее 10 станций на территории России в различных климатических зонах.

По структуре сети предполагается разделить станции мониторинга на 2 уровня: базовый и научный. Основной целью мониторинга на станциях базового уровня является обеспечение долгосрочных базовых химико-физических измерений, охватывающих параметры, требуемые для описания уровней осаждения черного углерода, а также временных тенденций их изменения. Существующие в отношении станций базового уровня требования также предусматривают измерение метеорологических параметров.

Деятельность станций базового уровня должна носить наиболее приоритетный характер при расширении сети и охватывать различные климатические зоны. Периодичность измерений базовой программы мониторинга должна быть достаточной для проведения анализа химических и физических характеристик переноса синоптического масштаба. Время отбора проб можно увеличивать в случае, если уровни концентрации настолько низки, что уровни обнаружения представляют проблему.

Станции научного уровня позволят получать дополнительную информацию о физических/химических свойствах черного углерода, которая является необходимой для оценки загрязнения воздуха, атмосферных осадков, осаждения в снежном покрове, а также его влияния на климат, и, таким образом, будут существенным образом дополнять деятельность станций базового уровня.

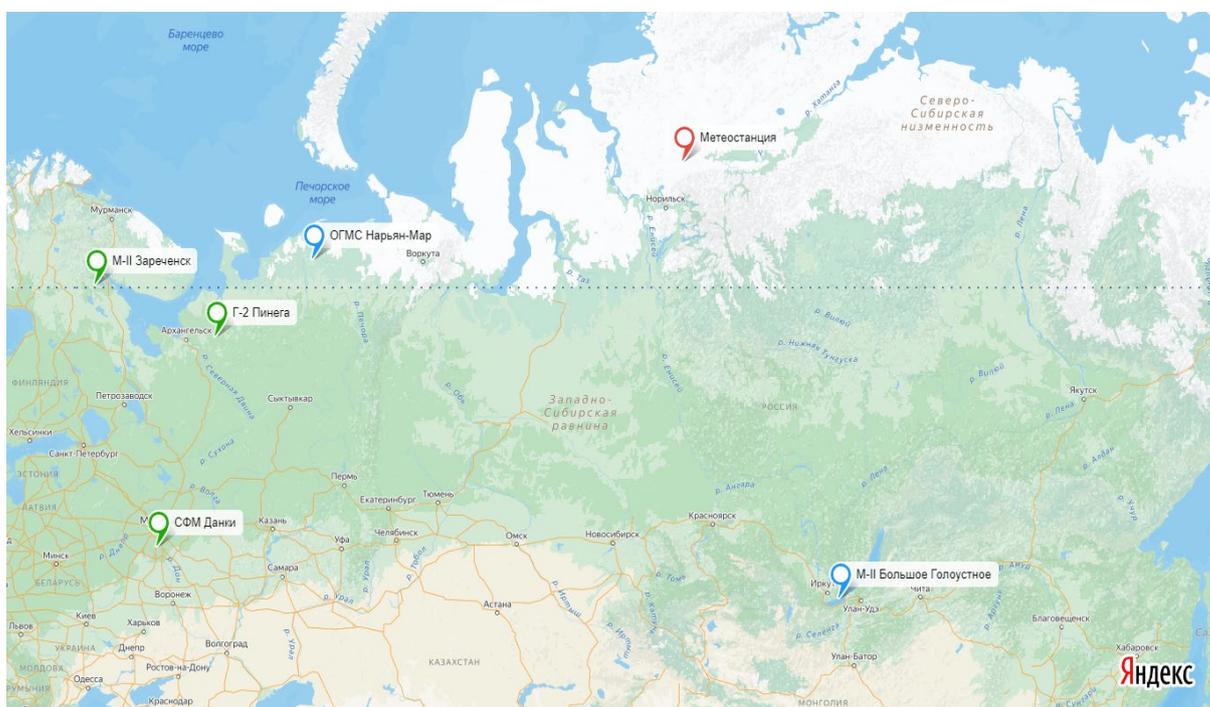
Измерения на станциях научного уровня охватывают все параметры, которые требуется определять на станциях базового уровня, а также ряд дополнительных параметров, включая альбедо снега и аэрологические измерения в тропосферном столбе.

Географический охват сети

Широкий географический охват сети позволит получать информацию о концентрациях черного углерода в различных климатических зонах. Сотрудниками ФГБУ «ИГКЭ» проводятся обследования территорий, на которых возможно проведение наблюдений за содержанием черного углерода.

Станции оцениваются по следующим критериям:

1. Метеорологическая информация.
2. Численность сотрудников.
3. Состояние помещения.
4. Состояние метеоплощадки.
5. Регулярность пересылки проб
6. Возможность доставки измерительного оборудования и проведения поверки.
7. Расстояние до локальных источников выбросов черного углерода.



Географический охват сети мониторинга черного углерода по состоянию на
2023 год

По результатам обследования создается заключение о возможности размещения станции мониторинга черного углерода на обследованной

территории, на основании которого происходит согласование программ наблюдений с региональным Управлением Росгидромета.

С 2022-2023 гг. наблюдения за содержанием черного углерода проводятся на станциях Данки (Центрального УГМС), Зареченск (Мурманского УГМС), Пинега (Северного УГМС). С 1 января 2024 года начнутся измерения на станции Большое Голоустное (Иркутское УГМС) и ОГМС Нарьян-Мар (Северное УГМС). С 1 января 2024 года начнет работу региональная аналитическая лаборатория на базе Иркутского ЦМС.

Работы по обследованию станций и близлежащих территорий проводятся сотрудниками ФГБУ «ИГКЭ» ежегодно, что позволяет регулярно открывать новые станции мониторинга черного углерода в соответствии с Планом мероприятий по развитию сети и ожидаемыми к 2029 году результатами.



Станция ЕМЕП Зареченск
(Мурманское УГМС)



Станция М-II Большое Голоустное
(Иркутское УГМС)



Станция Г-2 Пинега (Северное УГМС)



Станция Данки (Центральное УГМС)



ОГМС Нарьян-Мар
(Северное УГМС)

Основные методы мониторинга содержания черного углерода

Методы мониторинга содержание черного углерода можно разделить на две группы: физико-химические и дистанционные.

К дистанционным методам мониторинга, как правило, относят автоматические анализаторы, устанавливаемые на пунктах наблюдений, принцип работы которых основан на методах измерения поглощения. К основным методам определения концентрации черного углерода в аэрозолях относят: рефлектометрию, абсорбционную спектроскопию, фотоакустическую спектроскопию, а также методы, основанные на лазерно-индуцированном накале.

Рефлектометры работают по принципу измерения поглощения и отраженного света, проходящего через фильтр: в рефлектометре концентрация частиц определяется путем фильтрации газов в бумажном фильтре и регистрации соотношения между отраженным и поглощенным светом [16]. Фотоакустические датчики сажи в результате нагрева аэрозольных частиц генерируют волны акустического давления, которые регистрируются микрофоном. Регистрируемый сигнал пропорционален объемной концентрации светопоглощающих частиц <300 нм и поверхности более крупных частиц (>300 нм) [16, 17]. Приборы, основанные на методах лазерно-индуцированного накала, измеряют содержание частиц черного углерода посредством нагревания частиц, который происходит за счет поглощения света частицами [18, 19].

Известны два типа систем лазерно-индуцированного накаливания – технология с непрерывным излучением и технология импульсного излучения [20]. Общим принципом работы импульсных систем является нагрев импульсным лазером высокой энергии частиц в наносекундном временном масштабе. При этом результирующие сигналы с временным разрешением обнаруживаются на одной или нескольких узких длинах волн [21, 22].

Типичным прибором, основанным на принципе лазерно-индуцированного накаливания, являются коммерчески доступный фотометр SP2 (Droplet Measurement Technologies, США), который используется для измерения концентраций углеродсодержащих аэрозолей с 2006г [23-28], а также устройства, изготовленные по индивидуальному заказу (например, «SiLIIS», CNR-ICMATE, Италия, и «HS-LII», Канада).

Как правило, на станциях мониторинга устанавливают аэталометры, принцип работы которых основан на абсорбционной спектроскопии, либо фотометры, основанные на принципах лазерно-индуцированного накаливания.

Аэталометры (AE33, AE43, Aerosol Co., Словения) определяют количество частиц черного углерода за счет пропускания света через образец. Образец собирают на кварцевую ленту и измеряют коэффициент поглощения образца путем однократного пропускания света через образец, измеряемый относительно

чистого куска фильтра. В фильтре измеряется изменение светопропускания (поглощения) на семи длинах волн, что позволяет не только определять содержание сажи и черного углерода, (для определения концентрации ЧУ измерения проводят на длине волны 880 нм), но и определять источник частиц (сжигание топлива, горение древесины, сжигание биомассы и тд.) [29, 30].

Аэталометр является наиболее встречающимся прибором на станциях мониторинга воздуха, так как помимо измерения концентрации черного углерода, аэталометр может измерять концентрации сажи [19, 31].

Для лабораторного анализа проб воздуха, как правило, используют анализатор общего/органического углерода, основанный на принципе термokatалитического окисления. При этом отбор проб воздуха проводится с помощью четырехкаскадного импактора на тефлоновые или кварцевые фильтры, с которых затем делают смывы [32, 33]. Методы термokatалитического окисления также широко применяются для определения общего и органического углерода в жидких средах, включая атмосферные осадки и поверхностные воды.

Помимо анализаторов общего углерода возможно использование хроматоспектрометров высокого разрешения. Однако следует отметить, что хроматоспектрометрия не дает количественной оценки массовой концентрации черного углерода, поскольку эффективность обнаружения частиц черного углерода зависит от общего размера частиц [34].

Кроме описанных выше методов, существуют методики определения сажи и черного углерода с помощью более доступного неспецифического лабораторного оборудования (фотометры, муфельные печи и др.).

Методы мониторинга содержания черного углерода в России

Физико-химические методы анализа

В Российской Федерации (РФ) в зависимости от объектов исследования применяются разные методы и методики определения массовой концентрации черного углерода и сажи. В промышленных зонах используется

гравиметрическая методика определения массовой концентрации сажи в пыли при аналитическом контроле промышленных выбросов в атмосферу и воздуха рабочей зоны [35]. Метод основан на разложении навески пыли путем сжигания в атмосфере воздуха и определении массовой доли выгоревшей сажи взвешиванием остатка. Диапазоны измерений зависят от скорости аспирации и составляют 1,0-50000 мг/м³ в воздухе промышленной зоны и от 2,0 – 50 мг/м³ в воздухе рабочей зоны.

Для контроля загрязнения атмосферы в городах и других населенных пунктах мониторинг сажевого аэрозоля в атмосфере осуществляется преимущественно на стационарных постах. В последние годы все чаще используются данные о выбросах в атмосферу черного углерода на основе спутниковых измерений дистанционного зондирования тропосферы сетью GPS-приемников ГЛОНАСС [36]. Высокая стоимость аэталометров и спутниковых измерений не получили широкого распространения в РФ.

Определение содержания общего и растворенного органического углерода непосредственно в водных растворах (сточная вода, природная вода, в том числе питьевая вода, расфасованная в емкости) проводится с использованием анализаторов углерода в диапазоне от 1 до 1000 мг/дм³ [37]. Принцип действия метода основан на высокотемпературном каталитическом окислении соединений углерода, находящихся в пробе воды. Метод высокотемпературного сжигания в среде кислорода позволяет добиться более полного разложения органических соединений и получить более точные результаты.

В настоящее время в России не существует утвержденной методики измерения массовой концентрации черного углерода (сажи), применимой для фоновых территорий, поэтому для получения первичных данных о концентрациях черного углерода использовался РД 52.04.831-2015 «Массовая концентрация углеродсодержащего аэрозоля в пробах атмосферного воздуха» с некоторыми допущениями. Работы по модификации методики анализа и методики пробоотбора проводились в рамках научно-исследовательских работ совместно с Лимнологическим институтом СО РАН.

Для определения содержания черного углерода выбраны три типа территорий (городская, сельская, фоновая), различающиеся по физико-географическому положению и антропогенной нагрузке.

Территории отбора проб

Фоновые территории — Станция ЕМЕП Зареченск, станция Г-2 Пинега, станция Данки, поселок Большие Коты

Поселок Зареченск расположен на юго-западе Мурманской области в 120 км от районного центра — г. Кандалакша. Климат относится к умеренно-холодной зоне Атлантического сектора Арктики. Собственных локальных источников загрязнения атмосферы, кроме печного отопления домов в зимний период, поселок не имеет. Отбор проб проводится на метеоплощадке станции.

Посёлок Пинега расположен на правом берегу реки Пинеги, правом притоке Северной Двины. Через посёлок проходит автодорога. Метеостанция, на которой производился отбор проб, расположена в западной части поселка на правобережной террасе реки Пинега. Основным источником эмиссии черного углерода (сажи) — печное отопление.

Поселок Большие Коты удален от крупных промышленных центров Прибайкалья более чем на 100 км и собственных локальных источников загрязнения атмосферы, кроме печного отопления домов в зимний период, не имеет. В летний сезон поселок интенсивно посещается туристами, которые прибывают сюда на теплоходах и пешеходным маршрутом из п. Листвянка. ПН располагался на стационаре Лимнологического института СО РАН, находящегося в трехстах метрах от поселка.

Сельская территория — Поселок Листвянка

Сельская территория включала в себя туристический поселок Листвянка, расположенный на западном побережье Южного Байкала с населением около 2000 тысяч человек. Пункт наблюдения и отбора проб располагался на вершине прибрежного холма (200 м над уровнем озера), на территории Астрофизической

обсерватории ИСЗФ СО АН РАН. Здесь в непрерывном режиме круглогодично работает комплекс автоматических газоанализаторов за слежением в атмосфере различных газовых примесей, аэрозолей. С 2001 года станция вошла в международную программу «Сеть станций мониторинга кислотных выпадений в Восточной Азии - ЕАНЕТ». Расположение места отбора проб черного углерода на вершине холма позволило избежать влияния местных источников загрязнения атмосферы (поселка, автотранспорта) и отслеживать региональный перенос примесей от промышленных комплексов Прибайкалья [38, 39].

Городские территории — г. Москва, г. Иркутск

Городская урбанизированная территория включала г. Иркутск с населением около 620 тыс. человек, входящий в список 35-ти самых экологически неблагоприятных городов России, а также г. Москва с 13,1 млн. человек. Точки отбора проб располагались на территории Лимнологического института и ФГБУ «ИГКЭ».

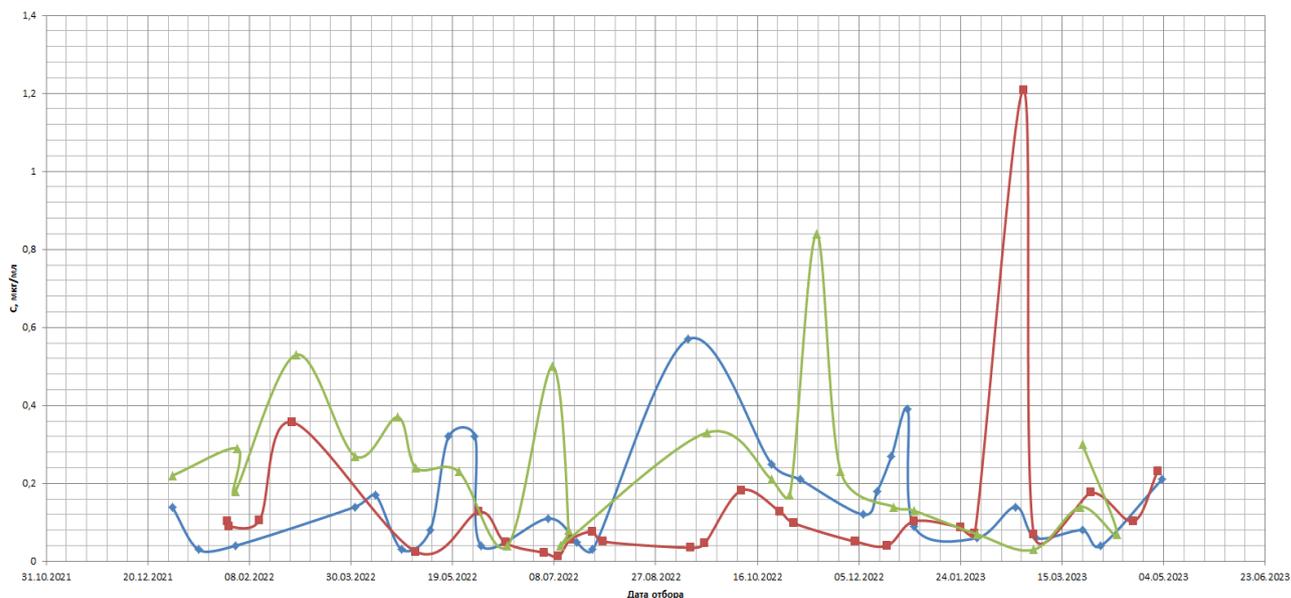
За период с 2022 по 2023 годы сотрудниками ФГБУ «ИГКЭ» проанализировано свыше 500 проб аэрозолей и атмосферных осадков, полученных с различных территорий отбора проб.

Территория отбора проб	Тип пробы	Количество
Зареченск (Мурманское УГМС)	Атмосферные осадки	28
Пинега (Северное УГМС)	Атмосферные осадки	33
Данки (Центральное УГМС)	Атмосферные осадки	28
	Аэрозоли	144
Иркутск (ЛИН СО РАН ¹)	Аэрозоли	192
Большие коты (ЛИН СО РАН)	Аэрозоли	34
Монды (ЛИН СО РАН)	Аэрозоли	20
Листвянка (ЛИН СО РАН)	Аэрозоли	11
Москва (ИГКЭ ²)	Аэрозоли	21

¹ В рамках совместных научно-исследовательских работ

² Эксперимент на «прыжок» частиц черного углерода

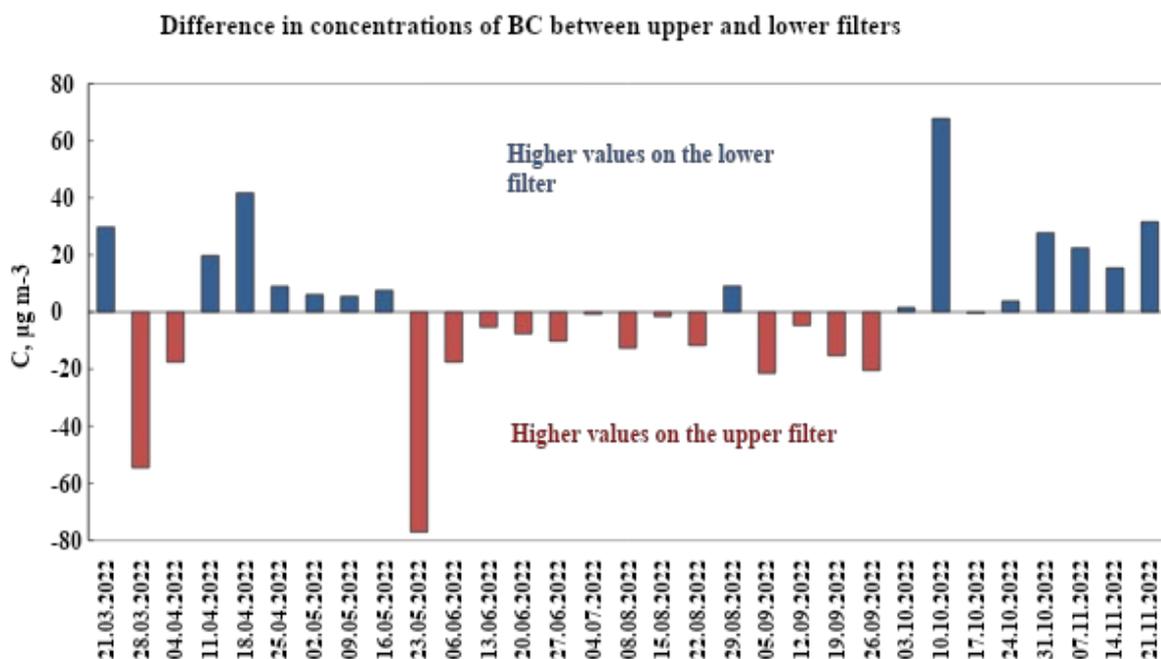
РД 52.04.831-2015 может использоваться также для определения концентрации углеродсодержащих частиц в водных растворах снеговой воды, атмосферных осадков, природных водах. Проведена оценка применимости существующей методики для определения сажи в пробах атмосферных осадков.



Определение содержания сажи в пробах атмосферных осадков на станциях Зареченск, Пинега, Данки в 2022-2023 гг.

Для этого взвешенные частицы концентрировали на фильтре и проводили определение как для проб атмосферного воздуха.

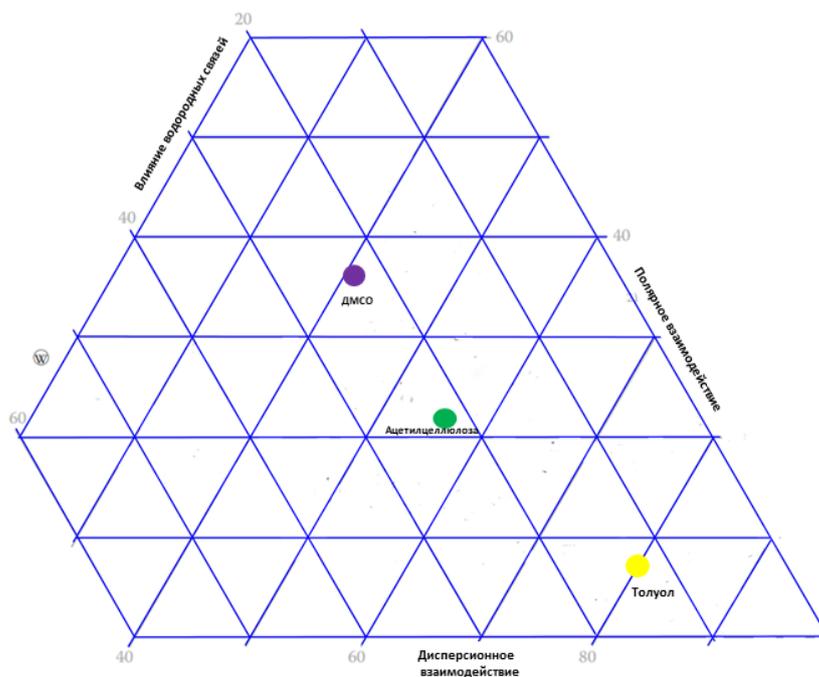
Поскольку разные фильтрующие материалы имеют разную пористость и структуру, было проведено экспериментальное исследование эффективности улавливания частиц черного углерода из потока воздуха различными типами фильтрующих материалов. Для проведения измерений в фильтродержатель кассетного типа устанавливали два фильтра типа АФА-ХП или АФА-ВП. Суточную пробу воздуха отбирали по стандартной методике на скорости отбора 1 л/мин.



Разница в массовых концентрациях сажи на фильтрах, последовательно установленных в кассетный фильтродержатель.

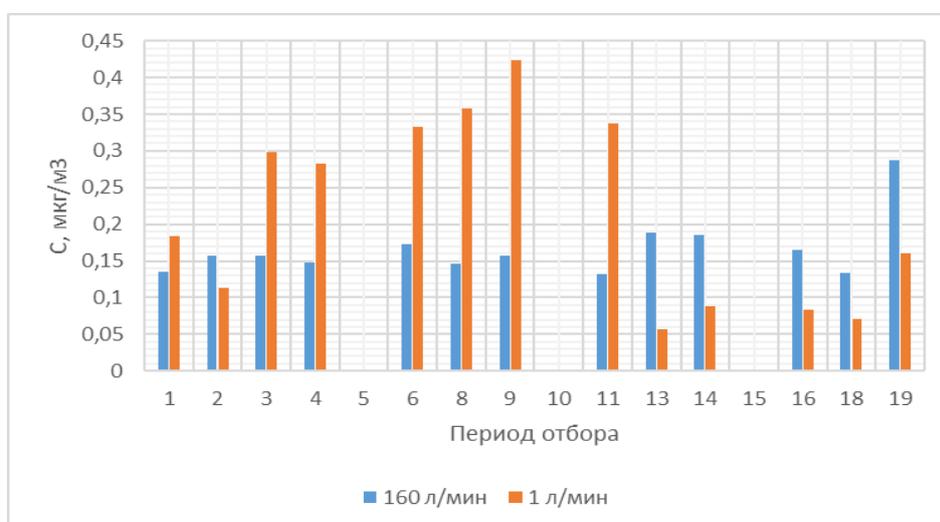
Показана неэффективность использования при отборе проб воздуха ацетилцеллюлозных фильтров.

Ввиду недостаточной растворимости фильтров в рекомендуемых Руководящим документом растворителях, проводились эксперименты по подбору оптимального растворителя для подготовки проб атмосферного воздуха к последующему анализу. Для этого использовалась термодинамическая модель, основанная на теории регулярных растворов. Показано, что для оптимального растворения ацетилцеллюлозных и перхлорвиниловых фильтров следует использовать смесь толуола и ДМСО в соотношении 1:1. Соотношение регулируется близостью к значениям материалов фильтров.



Треугольник растворимости для системы ДМСО - толуол

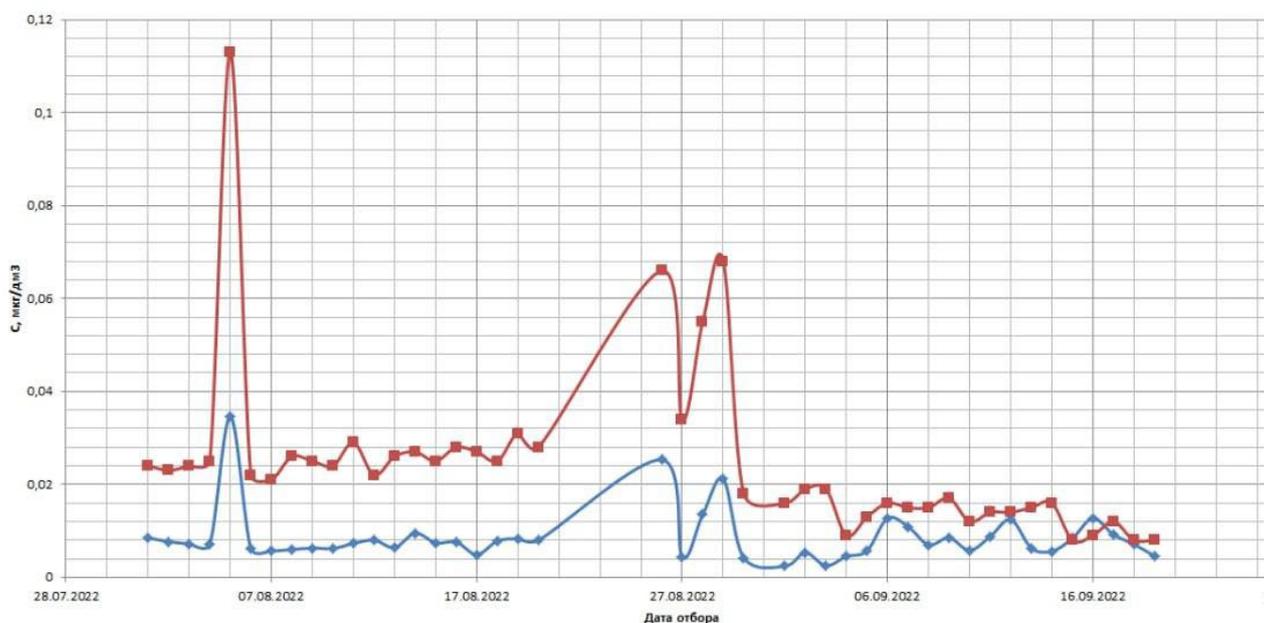
На первом этапе апробации методик отбора и анализа проб исследовалось влияние скорости отбора. В ходе измерения массовой концентрации сажи в пробах атмосферного воздуха, отобранных при скоростях отбора 160 л/мин и 1 л/мин, показано, что при увеличении скорости отбора происходит снижение количества частиц, остающихся на фильтрующем материале, и как следствие снижается значение массовой концентрации сажи.



Сравнение результатов измерений массовой концентрации сажи при разных скоростях отбора пробы

Показано, что полученные значения массовой концентрации сажи в пробах, отобранных на высоких скоростях отбора существенно меньше, чем в пробах, отобранных при скорости 1 л/мин. В дальнейшем при разработке методики измерения концентрации черного углерода (сажи) на фоновых территориях отбор на средних и высоких скоростях отбора может повлиять на чувствительность метода.

В ходе научно-исследовательской работы по апробации и модификации известных методик отбора и анализа проб совместно с Лимнологическим институтом СО РАН проверялась воспроизводимость методики, представленной в РД 52.04.831-2015 «Массовая концентрация углеродсодержащего аэрозоля в пробах атмосферного воздуха». В рамках межлабораторных сравнительных испытаний показана воспроизводимость методики определения массовой концентрации. Однако, использование в качестве стандартного образца технического углерода осложняет использование методики в аккредитованных аналитических лабораториях.



Межлабораторные измерения содержания сажи фотометрическим методом

Несмотря на хорошую воспроизводимость методики, доступность метода анализа и необходимых для его проведения оборудования и реактивов, её использование для определения массовой концентрации черного углерода (сажи) на фоновых территориях является нецелесообразным.

Следует разработать новую методику определения массовой концентрации черного углерода (сажи) с учетом полученных в ходе исследовательских работ данных о рекомендуемой скорости отбора и типе фильтрующего материала для отбора пробы. Необходимо отметить, что разработка такой методики в настоящее время осложняется отсутствием стандарта черного углерода.

В рамках опытно-конструкторских работ «Разработка и выпуск нового комплекса стандартных образцов для обеспечения единства измерений по приоритетным направлениям в целях технологического суверенитета Российской Федерации» при поддержке ФГБУ «ИГКЭ» сотрудниками ВНИИОФИ проводятся работы по созданию стандартного образца водной суспензии черного углерода, который позволит не только разработать методику инструментального определения черного углерода в пробах атмосферного воздуха, атмосферных осадков и снежного покрова, но и создать методику поверки автоматических анализаторов черного углерода (сажи), которые планируется установить на станциях научного уровня. Ожидаемый срок получения стандартного образца 4 квартал 2025 года.

Так как ФГБУ «ИГКЭ» является научно-методическим центром, осуществляющим руководство сетью, специалистами ФГБУ «ИГКЭ» разрабатываются Руководящие документы (РД), регламентирующие процедуры отбора и анализа проб атмосферного воздуха, осадков и снежного покрова с целью определения массового содержания черного углерода (сажи). В настоящее время, подготовлен макет РД по отбору проб.

Дистанционные методы мониторинга черного углерода в России

Как было указано выше, аэталометры являются наиболее встречающимся прибором на станциях мониторинга воздуха.

В России при исследовании черного углерода над морями и на станциях мониторинга в Арктическом бассейне, в Томской области используется разработанный в Институте оптики атмосферы Сибирского отделения Российской академии наук (ИОА СО РАН) аэталометр МДА-02. Прибор измеряет массовую концентрацию поглощающего вещества (Black Carbon (сажа)) VBC, (мкг/м³) в субмикронном атмосферном аэрозоле, эквивалентную концентрации черного углерода в воздухе [40-42]. Работа прибора основана на непрерывных измерениях аэталометрическим фильтровым методом диффузного ослабления света слоем аэрозольных частиц в процессе их осаждения на фильтр из прокачиваемого воздуха. При этом величина регистрируемого сигнала диффузного ослабления прямо пропорциональна поверхностной концентрации сажи на фильтре и, следовательно, ее массовой концентрации в воздухе. Концентрационная чувствительность аэталометра МДА-02 составляет около 10 нг/м³ при прокачке через прибор 30 литров воздуха. Аэталометр позволяет измерять массовую концентрацию сажи от 0,1 до 110 мкг/м³ с чувствительностью около 0,1 мкг/м³ при потоке воздуха 20 л/мин и использовать его для измерений фоновых концентраций [43, 44]. Абсолютная калибровка прибора выполняется в лабораторных условиях с помощью пиролизного генератора сажевых частиц и сопоставления данных синхронных оптических и гравиметрических измерений [45]. Также периодически проводится одновременные интеркалибровочные измерения массовой концентрации VBC в атмосферном аэрозоле с аэталометром MAAP-5012 (Thermo Scientific Co., USA). Прибор используется в научных целях и не внесен в Государственный реестр средств измерений.

В отделе микроэлектроники Научно-исследовательского института ядерной физики при МГУ совместно с химическим факультетом Московского государственного университета (МГУ) и Центральной аэрологической обсерваторией Росгидромета был разработан также портативный трехволновой аэталометр «Портаэталометр А1» для измерения концентрации аэрозольного эквивалента сажи (eBC) черного углерода в условиях арктического климата. В этом приборе ослабление света, вызванное отложением частиц на фильтре из кварцевого волокна, измеряется на трех длинах волн (450, 550 и 650 нм). Концентрации eBC определяли непрерывно путем преобразования, разрешенного во времени ослабления света в массу с использованием длины волны 650 нм. Калибровочный параметр был получен в ходе параллельных длительных измерений на аэталометре AE33 (Magee Scientific), работающем на семи длинах волн, три из которых идентичны блоку аэталометра «Портаэталометр А1». Аэталометр периодически калибруется на станции Глобальной службы атмосферы (GAW) в кооперации с греческим Национальным центром научных исследований «Демокритос» (Афины).

Разработанные в России аэталометры устанавливались на борту научно-исследовательских судов Арктического и Антарктического научно-исследовательского института во время морских экспедиций в Арктических морях, на стационарных арктических станциях. Так аэталометр и система отбора аэрозолей были установлены для длительного мониторинга характеристик арктических аэрозолей на высокоширотной российской станции «Ледовая база «Мыс Баранова», архипелаг Северная Земля. Полученные с высоким пространственно-временным разрешением данные о массовой концентрации черного углерода (eBC) на акваториях Белого, Баренцева и Карского морей показали ее значительную изменчивость: от фоновых значений порядка 20 нг/м³ до значений более 1000 нг/м³ в периоды переноса воздушных масс с континента. Данные о массовой концентрации черного углерода в Российской Арктике могут быть использованы в глобальных моделях дальнего переноса, а также для

проведения сравнительных измерений уровней загрязнений на российских полярных станциях [39,43,44].

Однако использование аэталометров и приборов, созданных ранее в России анализаторов, работа которых основана на методе диффузного ослабления света слоем аэрозольных частиц, на сети мониторинга Росгидромета для определения содержания черного углерода невозможно, поскольку данные приборы не внесены в Государственный реестр средств измерений (Госреестр СИ).

ФГБУ «ИГКЭ» неоднократно указывалась необходимость импортозамещения данного оборудования. Разработка отечественного прибора, который позволит автоматически определять необходимые характеристики: концентрации частиц черного углерода в атмосферном воздухе, изменения в поглощении проходящего излучения при различной длине волны, возможна.

В рамках совместных работ ФГБУ «ИГКЭ» и ФГБУ «ВНИИОФИ: Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений» подготовлен проект технического задания на разработку российского аналога аэталометра, позволяющего проводить непрерывные измерения содержания черного углерода (сажи) в атмосферном воздухе.

В 2024 году планируется заключение договора на проведение научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИОКР) сроком на три года. В ходе выполнения НИОКР должны быть разработаны и изготовлены один экспериментальный и два опытных образца анализатора массовой концентрации микрочастиц черного углерода в атмосферном воздухе.

Определение преобладающего источника черного углерода

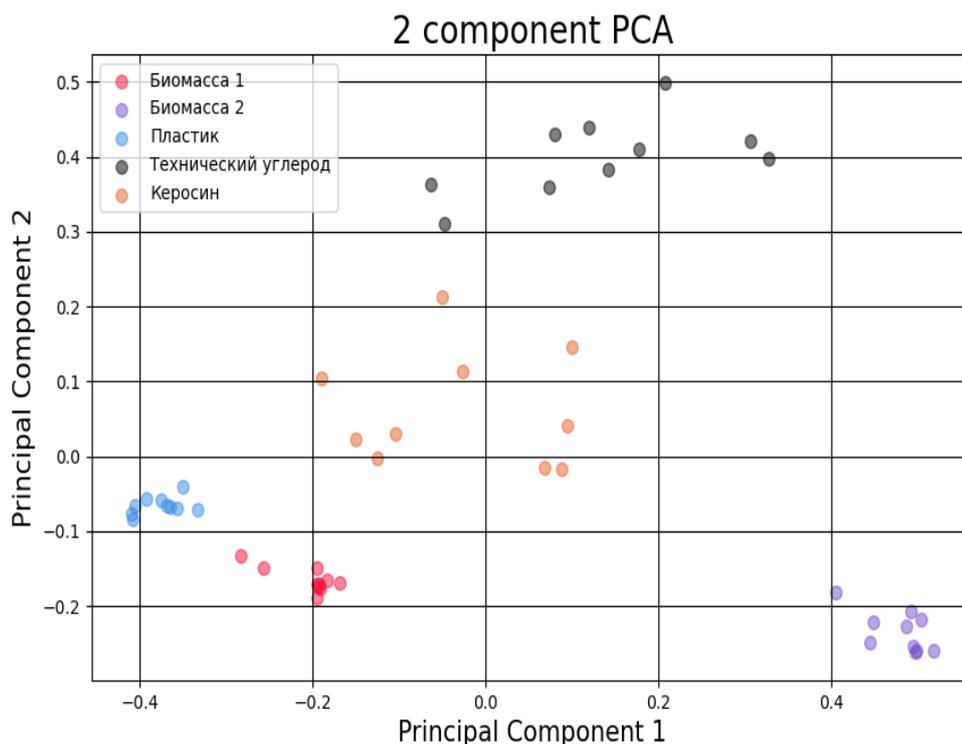
В рамках совместных работ ФГБУ «ИГКЭ» и ФГБУ «ВНИИОФИ: Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений» также проведен 1 этап эксперимента по оценке возможности определения преобладающего источника черного углерода в пробах атмосферного воздуха методом спектроскопии комбинационного рассеяния (Рамановской спектроскопии), так как эти спектры очень чувствительны даже к незначительным различиям в химическом составе анализируемых образцов за счет абсорбции на поверхности частиц черного углерода молекул других веществ, образовавшихся при неполном сгорании биомассы [46,47].

В дальнейшем, результаты этих исследований позволят разработать методику определения преобладающего источника эмиссии черного углерода для разных территорий и климатических зон, что в свою очередь важно для верификации климатических моделей.

Подготовленные образцы сажи от двух источников, горения биомассы и горения топлива, переданы на анализ, пробы атмосферного воздуха, отобранные в 2022 году на станции ЕАНЕТ Монды, а также пробы атмосферных осадков, отобранные на станции ЕМЕП Зареченск, переданы ФГБУ ВНИИОФИ для получения классификации частиц черного углерода по происхождению по спектрам комбинационного рассеяния с использованием методов хемометрики.

Наибольшие отличия между КР спектрами образцов разных групп были выявлены в диапазоне волновых чисел от 750 до 2500 см⁻¹, соответствующие фрагменты измеренных спектров обрабатывались методами хемометрики и машинного обучения.

Для разделения полученных спектральных данных на химически осмысленные составляющие был применен метод анализа главных компонент. Полученные результаты (см. рис.1) показали, что спектры продуктов сжигания биомассы целесообразно разделить на два различных класса. Таким образом, общее число классов возрастает до пяти.



Проекция спектров комбинационного рассеяния в плоскости главных компонент

Спектры частиц технического углерода, продуктов сжигания пластика и продуктов сжигания керосина целесообразно выделять в самостоятельные классы. На основе такого разбиения была обучена модель классификации образцов частиц черного углерода. Для обучения модели был сформирован набор, состоящий из 10 информативных фрагментов КР спектров каждого из пяти названных классов. Обучение производилось с использованием экстремального градиентного бустинга – одного из современных алгоритмов машинного обучения, позволяющего обойтись небольшим числом образцов в обучающем наборе.

Для оценки предсказательной способности (валидации) модели был сформирован набор из 10 спектров, которые не были использованы в процессе обучения. Результаты валидации показали правильное распознавание классов для всех 10 образцов тестового набора с доверительными вероятностями в интервале 85-95 %.

Перспективы развития сети мониторинга черного углерода в России

На сегодняшний день в состав сети входят пять наблюдательных постов Росгидромета и две аналитические лаборатории. Наблюдения проводятся по типовой программе, рекомендованной для станций базового уровня, и включают в себя отборы проб атмосферных осадков, проб снежного покрова. На станции Нарьян-Мар в программу наблюдений также включены аэрологические наблюдения.

По результатам исследований, проведенных в 2022-2023 годах получено два свидетельства РИД. Также результаты измерения содержания массового содержания сажи в пробах атмосферных осадков были представлены на международной конференции Japan Geoscience Union Meeting 2023, а результаты эксперимента по определению преобладающего источника черного углерода методами спектроскопии комбинационного рассеяния представлены на всероссийской научно-технической конференции «Метрологическое обеспечение фотоники 2023» сотрудниками ФГБУ ВНИИОФИ совместно с сотрудниками ФГБУ «ИГКЭ».

Работы по созданию сети (расширению ее географического охвата), разработке типовой и расширенных программ наблюдений за черным углеродом (сажей), разработке методов определения содержания черного углерода, разработке и размещению автоматической измерительной аппаратуры на станциях научного уровня, разработке и выпуску методик выполнения измерений содержания черного углерода, а также разработке документа, регламентирующего организацию и проведение режимных наблюдений за содержанием черного углерода на негородских (включая фоновые) станциях мониторинга загрязняющих воздух веществ будут проведены до 2030 г. Основные этапы работ по развитию сети мониторинга, а также ожидаемые результаты, представлены в таблице.

При оценке перспектив развития сети необходимо учитывать множество различных факторов, включая экономические, однако, на данном этапе можно

предположить, что в долгосрочной перспективе проект по созданию и развитию сети мониторинга черного углерода будет выполнен в полном объеме.

Ожидаемые результаты работ по развитию сети мониторинга черного углерода

Направление работ	2023 год	2024 год	2025 год	2026 год	2027 год	2028 год	2029 год	Итого к 2029 году
Разработка нормативно-технической документации	Рекомендации по отбору проб	Разработка проекта "Методика выполнения измерений содержания черного углерода в атмосферном воздухе и осадках"	РД "Методика выполнения измерений содержания черного углерода в атмосферном воздухе и осадках"	Типовая программа мониторинга черного углерода на сети Росгидромета	Макет РД "Организация и проведение режимных наблюдений за содержанием черного углерода на негородских (включая фоновые) станциях мониторинга загрязняющих воздух веществ "	РД "Организация и проведение режимных наблюдений за содержанием черного углерода на негородских (включая фоновые) станциях мониторинга загрязняющих воздух веществ "	Создание стратегии мониторинга черного углерода на 2030-2029 гг.	Пакет документов, регламентирующих организацию и проведение наблюдений за содержанием черного углерода, включая правила отбора, транспортировки, хранения, анализа проб.
Наукометрические показатели	Не менее 1 РИД, не менее 2 докладов (тезисов) международных конференций, не менее 1 статьи ВАК, не менее 1 публикации в ядре РИНЦ	Не менее 1 РИД, не менее 2 докладов (тезисов) международных конференций, не менее 1 статьи ВАК, не менее 1 публикации в ядре РИНЦ	Не менее 1 РИД, не менее 2 докладов (тезисов) международных конференций, не менее 1 статьи ВАК, не менее 1 публикации в ядре РИНЦ, 1 НД	Не менее 1 РИД, не менее 2 докладов (тезисов) международных конференций, не менее 1 статьи ВАК, не менее 1 публикации в ядре РИНЦ	Не менее 1 РИД, не менее 2 докладов (тезисов) международных конференций, не менее 1 статьи ВАК, не менее 1 публикации в ядре РИНЦ	Не менее 1 РИД, не менее 2 докладов (тезисов) международных конференций, не менее 1 статьи ВАК, не менее 1 публикации в ядре РИНЦ, 1НД	Не менее 1 РИД, не менее 2 докладов (тезисов) международных конференций, не менее 1 статьи ВАК, не менее 1 публикации в ядре РИНЦ	Не менее 7 РИД, не менее 14 докладов (тезисов) международных конференций, не менее 7 статей ВАК, не менее 7 публикации в ядре РИНЦ, 2 НД

Направление работ	2023 год	2024 год	2025 год	2026 год	2027 год	2028 год	2029 год	Итого к 2029 году
Развитие сети мониторинга	Согласование с УГМС размещения региональной станций мониторинга черного углерода в 2024 году	Согласование с УГМС размещения региональной станций мониторинга черного углерода в 2025 году	Согласование с УГМС размещения региональной станций мониторинга черного углерода в 2026 году	Согласование с УГМС размещения региональной станций мониторинга черного углерода в 2027 году	Согласование с УГМС размещения региональной станций мониторинга черного углерода в 2028 году	Согласование с УГМС размещения региональной станций мониторинга черного углерода в 2029 году	Согласование с УГМС размещения региональной станций мониторинга черного углерода в 2030 году.	Не менее 10 станций мониторинга черного углерода. Не менее двух лабораторий
Научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы	Договор о проведении НИР, промежуточный научно-технический отчет	Промежуточный научно-технический отчет	Заключительный научно-технический отчет, протокол исследовательских испытаний, методика измерений и свидетельство о ее аттестации. ТЗ на ОКР. Получение опытного образца.	Закупка и ввод в эксплуатацию анализатора аэрозольных частиц	Наладка системы получения данных от УГМС по концентрациям аэрозольных частиц ЧУ и сажи с использованием автоматического анализатора аэрозольных частиц (черного углерода (сажи))			Не менее 10 приборов

Заключение

Развитие надежных инструментальных методов количественного определения углеродсодержащих аэрозолей в различных природных средах невозможно без фундаментальных исследований природы и физико-химических свойств черного углерода. В связи с этим, необходимо отметить важность проведения исследований оптических и морфологических свойств частиц черного углерода, их ад- и абсорбционных способностей различными физико-химическими методами. На основании полученных результатов будет возможна разработка стандартизированных воспроизводимых методик измерения. Результаты измерений, полученные посредством анализа точечно отобранных проб, а также результаты непрерывных дистанционных измерений при необходимости верификации моделей трансграничного атмосферного переноса оценки представительности результатов по данным мониторинга, а также для верификации климатических моделей.

Работы по созданию и развитию сети мониторинга черного углерода (сажи) целесообразно разделять на четыре больших этапа, охватывающие все аспекты развития сети от фундаментальных научных исследований до создания нормативной документации и проведения НИОКРов по разработке сложной измерительной аппаратуры.

Работы по созданию и развитию сети мониторинга черного углерода (сажи) имеют большое значение для разработки стратегии по снижению выбросов углеродсодержащих аэрозолей.

Источники

1. Кручина Е.Б., Безденежных В.А. Унификация термина «Черный углерод» // Экология и природопользование: прикладные аспекты. - Уфа: Башкирский государственный педагогический университет им. М. Акмуллы (Уфа), 2022. - С. 137-142.
2. Andreae, M. O. Soot carbon and excess fine potassium: Long-range transport of combustion derived aerosols. // Science. - 1983. - №220. - С. 1148–1151.
3. Rosen, H., Hansen, A. D. A, Novakov. Role of graphitic carbon particles in radiative transfer in the Arctic haze. // Sci. Total Environ. - 1984. - №36. - С. 103–110.
4. Warren, S. G., Wiscombe, W. J. A model for the spectral albedo of snow. II: Snow containing atmospheric aerosols // J. Atmos. Sci. - 1980. - №37. - С. 2734–2745.
5. Hansen, A.D.A., Rosen, H. Vertical distributions of particulate carbon, sulfur, and bromine in the Arctic haze and comparison with ground-level measurements at Barrow, Alaska. // Geophys. Res. Lett. - 1984. - №11. - С. 381–384.
6. Clarke, A. D., Noone, K. J. Soot in the Arctic snowpack: A cause for perturbations in radiative transfer. // Atmos. Environ. - 1985. - №19. - С. 2045–2053.
7. Jacobson, M. Z. A physically-based treatment of elemental carbon optics: Implications for global direct forcing of aerosols. // Geophys. Res. Lett. - 2000. - №27(2). - С. 217–220.
8. Hansen, J. E., Sato, M., Ruedy, R. Global warming in the twenty-first century: An alternative scenario. // P. Natl. Acad. Sci. USA. - 2000. - №97(18). - С. 9875–9880.
9. Bond, T. C., Doherty, S. J., Fahey, D. W. Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment. // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. - 2013. - №118. - С. 5380-5552.
10. Janssen, Nicole AH, Gerlofs-Nijland, Miriam E, Lanki, Timo, Salonen, Raimo O, Cassee, Flemming. et al. (2012). Health effects of black carbon. World Health Organization. Regional Office for Europe
11. Шевченко В. П. Распределение и источники черного углерода в российской Арктике. // Презентация на российско-американском академическом

- симпозиуме по проблемам черного углерода, проводимом совместно Национальной академией наук США и Российской академией наук. - Москва: 2012.
12. Status of black carbon monitoring in ambient air in Europe European Environment Agency // <https://www.waste.ccacoalition.org/document/status-black-carbon-monitoring-ambient-air-europe> (дата обращения: 10.12.2023)
 13. G. Fuller, D. Green and A. Font Environmental Research Group, Imperial College London 2019 ANNUAL REPORT FOR THE UK BLACK CARBON NETWORK. ISSN: 20596030
 14. Серджи Б., Азеведо И., Дэвис С.Дж., Мюллер Н.З. Региональные и окружные потоки повреждения твердыми частицами в США // Письма об экологических исследованиях, 2020, т. 15, № 10. С. 104073
 15. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 19.09.2022 №2700-р// Официальный интернет-портал правовой информации — 2022
 16. Onasch, T. B., Trimborn, A., Fortner, E. C., Jayne, J. T., Kok, G. L., Williams, L. R., Davidovits, P., and Worsnop, D. R.: Soot particle aerosol mass spectrometer: Development, validation, and initial application. *Aerosol Science and Technology*, 46, 804-817, <https://doi.org/10.1080/02786826.2012.663948>, 2012.
 17. Quincey, Paul & Butterfield, David & Green, David & Coyle, Mhairi & Cape, Neil. (2009). An evaluation of measurement methods for organic, elemental and black carbon in ambient air monitoring sites. *Atmospheric Environment*. 43. 5085 - 5091. [10.1016/j.atmosenv.2009.06.041](https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.06.041).
 18. Wang, Y., Han, Y., Zhu, T., Li, W., & Zhang, H. (2018). A prospective study (SCOPE) comparing the cardiometabolic and respiratory effects of air pollution exposure on healthy and pre-diabetic individuals. *Science China Life Sciences*, 61(1), 46–56. <https://doi.org/10.1007/s11427-017-9074-2>.
 19. Onasch, T. B., Trimborn, A., Fortner, E. C., Jayne, J. T., Kok, G. L., Williams, L. R., Davidovits, P., and Worsnop, D. R.: Soot particle aerosol mass spectrometer: Development, validation, and initial application. *Aerosol Science and Technology*, 46, 804-817, <https://doi.org/10.1080/02786826.2012.663948>, 2012.

20. Amaral, S.S.; De Carvalho, J.A., Jr.; Costa, M.A.M.; Pinheiro, C. An Overview of Particulate Matter Measurement Instruments. *Atmosphere* 2015, 6, 1327-1345. <https://doi.org/10.3390/atmos6091327>.
21. North American Black Carbon Emissions Estimation Guidelines: Recommended Methods for Estimating Black Carbon Emissions. / Montreal, Canada: Commission for Environmental Cooperation. — 2015.
22. Giechaskiel, B.; Maricq, M.; Ntziachristos, L.; Dardiotis, C.; Wang, X.; Axmann, H.; Bergmann, A.; Schindler, W. Review of motor vehicle particulate emissions sampling and measurement: From smoke and filter mass to particle number. *J. Aerosol Sci.* 2014, 67, 48–86
23. Stefan Åström, Mikael Hildén, Bradley Matthews Elements in the policy landscape for action on black carbon in the Arctic — 2021. — No. E0038, 86p.
24. K. Enamul Haque, Mani Nepal, Pranab Mukhopadhyay, Md Rumi Shammin Climate Change and Community Resilience/Springer. — 2021.
25. Michael Levitsky Black Carbon and Climate Change Considerations for International Development Agencies /The International Bank for Reconstruction and Development. — 2021.
26. M. O. Andreae and A. Gelencser' Black carbon or brown carbon? The nature of light-absorbing carbonaceous aerosols/ *Atmos. Chem. Phys.* — 2006.— V. 6, P. 3131–3148.
27. Balram Ambade, Tapan Kumar Sankar, Amit Kumar, Alok Sagar Gautam Sneha Gautam COVID-19 lockdowns reduce the Black carbon and polycyclic aromatic hydrocarbons of the Asian atmosphere: source apportionment and health hazard evaluation/ *Environment, Development and Sustainability.* — 2021. — V. 23, P.12252–12271
28. РД 52.04.831-2015 Массовая концентрация углеродсодержащего аэрозоля в пробах атмосферного воздуха — Дата введения 01.03. 2016
29. Jinfeng Yuan: Optical properties of atmospheric black carbon aerosols (BC) and BC mass measurements with laser-induced incandescence (LII) instruments in the

- laboratory and the field, Published by ETH Zurich, <https://doi.org/10.3929/ethz-b-000477276>, 2021
30. Quincey, Paul & Butterfield, David & Green, David & Coyle, Mhairi & Cape, Neil. (2009). An evaluation of measurement methods for organic, elemental and black carbon in ambient air monitoring sites. *Atmospheric Environment*. 43. 5085 - 5091. [10.1016/j.atmosenv.2009.06.041](https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.06.041)
 31. Dutt, Upma. (2019). Application of the Aethalometer for black carbon source analysis
 32. K. Sandeep, A.S. Panicker, Alok Sagar Gautam, G. Beig, Naveen Gandhi, Sanjeev S, R. Shankar, H.C. Nainwal, Black carbon over a high altitude Central Himalayan Glacier: Variability, transport, and radiative impacts, *Environmental Research*, Volume 204, Part B, 2022, 112017,
 33. Teresa K. Spohn, Damien Martin, Michael Geever, Colin O'Dowd Black carbon measurements from Ireland's Atmospheric Composition and Climate Change (AC3) network/ *Atmospheric Environment Volume*. — 2022. — V. 271, P. 1352-2310.
 34. Lack, D.A.; Lovejoy, E.R.; Baynard, T.; Pettersson, A.; Ravishankara, A.R. Aerosol Absorption Measurement Using Photoacoustic Spectroscopy: Sensitivity, Calibration, and Uncertainty Developments. *Aerosol Sci. Technol.* 2006, 40, 697–708.
 35. ФР.1.31.2001.00384. Методика измерения массовой концентрации сажи в промышленных выбросах и в воздухе рабочей зоны. Ярославль. – 2005. – 9 с.
 36. Виноградова А. А., Иванова Ю. А. Атмосферный перенос черного углерода в Российскую Арктику от различных источников (зима и лето 2000–2016 гг.) // *Оптика атмосферы и океана*. – 2023. – Т. 36. – № 06. – С. 425–432. DOI: [10.15372/AOO2023060](https://doi.org/10.15372/AOO2023060)
 37. ГОСТ 31958-2012. Вода. Методы определения содержания общего и растворенного органического углерода. М.: Стандартинформ. – 2019. – 15 с.
 38. Оболкин В.А., Потемкин В.Л., Макухин В.Л., Ходжер Т.В., Чипанина Е.В. Дальний перенос шлейфов атмосферных выбросов региональных угольных

- ТЭЦ на акваторию Южного Байкала // Оптика атмосферы и океана. – 2017. – Т. 30. – № 1. – С. 60-65. doi.org/10.15372/AOO20170108.
39. Obolkin V., Molozhnikova E., Shikhovtsev M., Netsvetaeva O., Khodzher T. Sulfur and Nitrogen Oxides in the Atmosphere of Lake Baikal: Sources, Automatic Monitoring, and Environmental Risks // Atmosphere. – 2021. – Vol. 12. – No 10. – P. 1-10. doi.org/10.3390/atmos12101348.
40. Kozlov V.S., Yausheva 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 // International Journal of Remote Sensing. – 2014. – Vol. 35. – P. 5722–5741.
41. Kozlov V.S., Shmargunov V.P., Panchenko M.V. Modified aethalometer for monitoring of black carbon concentration in atmospheric aerosol and technique for correction of the spot loading effect // Proceedings of SPIE, 22nd International Symposium Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. – 2016. – 1003530. DOI:10.1117/12.2248009.
42. Козлов В.С., Шмаргунов В.П., Полькин В.В. Спектрофотометры для исследования характеристик поглощения света аэрозольными частицами // Приборы и техника эксперимента. – 2008. – №5. – С.155-157.
43. Зенкова П. Н., Чернов Д. Г., Шмаргунов В. П., Панченко М. В., Белан Б. Д. Субмикронный аэрозоль и поглощающее вещество в тропосфере российского сектора Арктики по данным измерений самолета-лаборатории Ту-134 «Оптик» в 2020 г. // Оптика атмосферы и океана. – 2021. – Т. 34. – № 11. – С. 882–890. DOI: 10.15372/AOO20211108.
44. Сакерин С.М., Кабанов Д.М., Калашникова Д.А., Кравчишина М.Д., Круглинский И.А., Макаров В.И., Попова С.А., Почуфаров А.О., Симонова Г.В., Турчинович Ю.С., Дарьин Ф.А. Пространственно-временная изменчивость характеристик атмосферного аэрозоля над Карским, Баренцевым, Норвежским и Гренландским морями (экспедиции 2018-2021 гг.) // Оптика атмосферы и океана. – 2022. – Т.35. – № 6. – С. 447-455. DOI: 10.15372/AOO20220603.

45. Успенский А.А., Вольберг Н.Ш., Степаков А.В. Усовершенствование фотометрического метода определения концентрации сажевого аэрозоля в атмосферном воздухе // Труды ГГО. – 2014. – Вып. 572. – С. 44-562.
46. J. Sandradewi et al, *Atmospheric Environment*, 2008, V.42, P.P. 101–112
47. Feng Y et al, *Science of Total Environment*, 2019 V. 685, P.P. 189-196.