

ТВЕРДЫЕ ЧАСТИЦЫ КАК ИНДИКАТОР РАЗМЕЩЕНИЯ ПОСТОВ НАБЛЮДЕНИЯ ЗА ЗАГРЯЗНЕНИЕМ АТМОСФЕРЫ В МУРМАНСКЕ

И. П. Опутина

ФГБУ УралНИИ «Экология» (Пермь, Российская Федерация)

В. А. Шкляев

ФГБОУ Пермский государственный национальный исследовательский университет,
ФГБУ УралНИИ «Экология» (Пермь, Российская Федерация)

Н. В. Костылева

ФГБУ УралНИИ «Экология», ФГБОУ Пермский государственный национальный
исследовательский университет (Пермь, Российская Федерация)

Статья поступила в редакцию 29 декабря 2021

Приводятся результаты натурных замеров и анализа проб атмосферного воздуха в 25 характерных точках на территории Мурманска в 2017–2018 гг. Для всех отобранных частиц с использованием сканирующего электронного микроскопа высокого разрешения S-3400N фирмы «Hitachi» был определен гранулометрический, морфологический и химический состав. Рассмотрены метеорологические условия в даты отбора проб с точки зрения их влияния на рассеивание загрязняющих веществ. Полученные результаты позволили предварительно определить на территории Мурманска наиболее и наименее зависимые от метеорологических условий области, а также сформулировать рекомендации по совершенствованию сети наблюдения за атмосферным воздухом в городе.

Ключевые слова: загрязнение атмосферы, сканирующий электронный микроскоп, перенос примесей в атмосфере.

Введение

Вопросы загрязнения атмосферного воздуха актуальны для всех регионов России. В различных населенных пунктах источники и интенсивность загрязнения воздуха различны, однако проблемы наблюдения за его состоянием практически одинаковы.

Среди факторов, влияющих на уровень загрязнения, можно выделить количество и мощность стационарных и передвижных источников загрязнения атмосферы. Помимо этого на качество атмосферного воздуха влияют региональные особенности метеорологического и климатического режимов, в том числе зависящие от рельефа местности и особенностей подстилающей поверхности [1–4]. Приоритетность

факторов, влияющих на уровень загрязнения атмосферного воздуха, однозначно не установлена. Например, согласно данным Э. Ю. Безуглой, метеорологические и климатические условия могут перекрывать по значимости количество и мощность источников загрязнения атмосферы [5–8]. Таким образом, при организации наблюдений анализ и учет региональных особенностей рассеивания примесей в атмосфере, определяемых метеорологическими и климатическими условиями, являются неотъемлемой частью создания системы мониторинга загрязнения атмосферного воздуха и принятых по его результатам управленческих природоохранных решений.

Наглядным примером того, как метеорологические и климатические условия могут перекрывать по значимости влияния мощность выбросов загрязняющих веществ, является ситуация в Мурманске.

В 2018 г. в рамках договорной работы Уральский государственный научно-исследовательский институт региональных экологических проблем (УралНИИ «Экология») выявлял приоритетные источники пылевого загрязнения атмосферного воздуха преимущественно в центре города на основе результатов исследования различных характеристик твердых частиц. Рассматриваемое исследование в Мурманске в 2018 г. имело прикладные цели, и его программа была разработана в соответствии с этими целями и имеющимися в городе возможностями инструментальных измерений. Поэтому сведения, приведенные ниже, являются дополнительными результатами, которые получены в ходе достижения основных целей.

Безусловно, классический подход к изучению перемещения загрязняющих веществ (движение трассеров) посредством синхронного отбора проб во многих точках был бы более информативен, однако такое исследование изначально не планировалось из-за отсутствия полноценной технической обеспеченности измерений в Мурманске.

В таких условиях получение дополнительной информации косвенными методами также можно считать актуальным, позволяющим повысить изученность рассматриваемой проблемы.

В настоящее время на территории Мурманска функционируют три стационарных поста наблюдения за загрязнением атмосферного воздуха (ПНЗ) сети Росгидромета: ПНЗ № 8 (ул. Папанина, 32А), ПНЗ № 12 (ул. Лобова, 24А), ПНЗ № 15 (ул. Беринга, 15). Их местоположение показано на рис. 1 (ПНЗ № 15 расположен к югу за пределами фрагмента карты, приведенного на рисунке).

Согласно государственному докладу «О состоянии и об охране окружающей среды Мурманской области в 2018 году» [9], содержание твердых загрязняющих веществ в выбросах в атмосферный воздух от стационарных источников в Мурманской области за 2018 г. составило 12,7% (27,2771 тыс. т). Однако в документе не приведены данные о составе указанных твердых веществ.

Хотя Мурманская область официально относится к Арктической зоне России, климат региона имеет

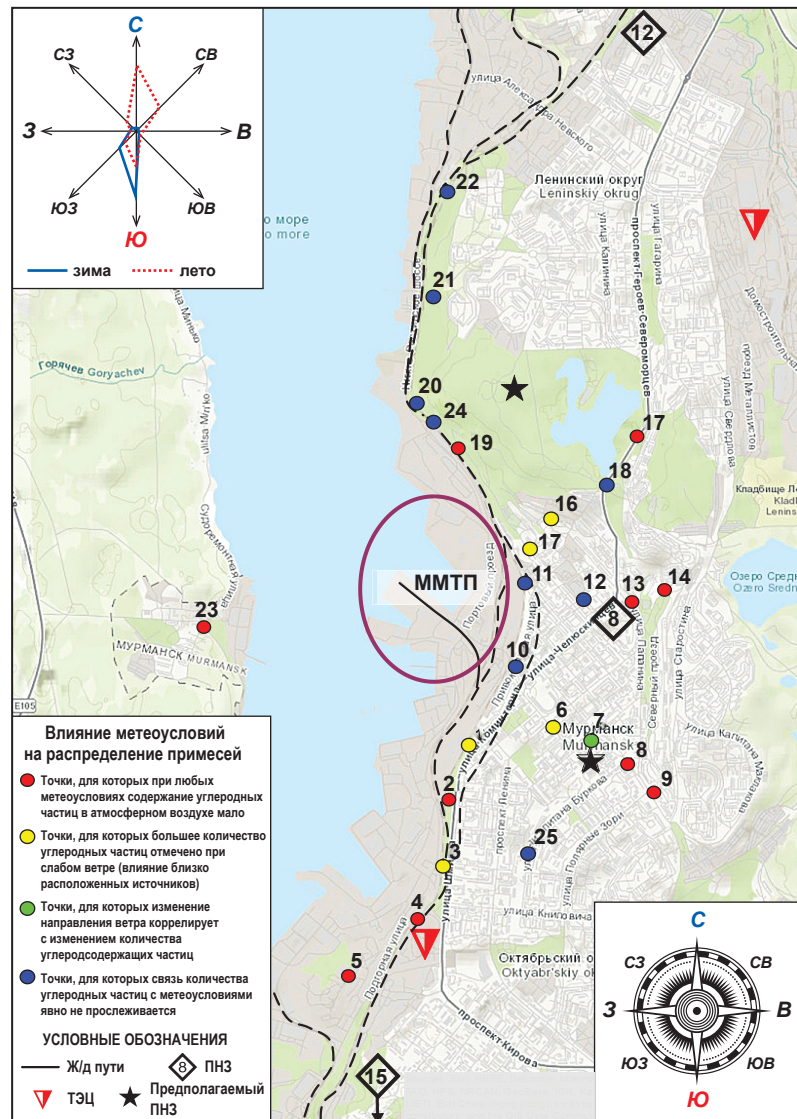


Рис. 1. Схема расположения точек отбора проб атмосферного воздуха в Мурманске (составлено с помощью веб-картографической платформы Google Maps)
Fig. 1. Scheme of location of atmospheric air sampling points in Murmansk (compiled by the using a web mapping platform Google Maps)

особенности и отличия от климата иных арктических субъектов Федерации. По сравнению с другими заполярными регионами климат области можно назвать мягким за счет влияния теплого и влажного воздуха Атлантики. В свою очередь, расположение Мурманска на побережье Кольского залива способствует появлению местных факторов, влияющих на рассеивание и перемещение примесей в атмосфере. Таким образом, распространение полученных в результате исследования выводов на другие арктические регионы нельзя считать достоверным.

Как известно, выброс углеродсодержащих частиц возникает также при сжигании дизельного топлива автотранспортом. Однако точки отбора проб умышленно выбирались на отдаленном расстоянии от автомагистралей, где движение автотранспор-

та было существенным и могло оказать влияние на результаты измерений. По данным упомянутого государственного доклада [9], общий вклад передвижных источников в суммарные выбросы твердых веществ в атмосферный воздух Мурманской области в 2018 г. составил не более 0,4%.

Основной целью исследования являлось выявление источников выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух Мурманска, приводящих к образованию «черного налета» на снегу и фасадах зданий. Дополнительные цели — демонстрация возможности применения морфологического анализа пылевых частиц как дополнения к химическому анализу при выявлении источников пылевого загрязнения воздуха, а также разработка предложений для оптимизации системы мониторинга загрязнения воздуха (прежде всего твердыми частицами) в Мурманске.

Материалы и методы исследования

В качестве объекта исследования были выбраны характеристики твердых частиц — гранулометрические, морфологические и химические показатели, которые предполагалось рассматривать в качестве индикаторов уровня и источников загрязнения атмосферного воздуха, так как они позволяют наглядно показать загрязнение в разных районах города, а вместе с тем дают возможность изучить перемещения загрязняющих веществ, обусловленные метеорологическими и климатическими условиями.

Программа исследования предусматривала три серии инструментальных измерений, которые проводили специалисты Центра лабораторного анализа и технических измерений (ЦЛАТИ) по Мурманской области (I и II серии) и Федерального научного центра медико-профилактических технологий управления рисками здоровью населения (ФНЦ) (III серия) в 25 точках на территории Мурманска. Всего отобрано 75 проб атмосферного воздуха (три серии по 25 проб).

Специалисты ЦЛАТИ использовали аспиратор ПА-300М-2, измеритель микроклимата «Метеоскоп-М», анализатор аэрозоля DustTrak 8533.

Специалисты ФНЦ использовали аспиратор марки ПУ-3Э/12, прибор для отбора проб воздуха «ПА-300М-1», анализатор аэрозоля DustTrak 8533 (измерение массовой концентрации мелкодисперсных частиц PM_{2,5} и PM₁₀), измеритель микроклимата «Метеоскоп-М».

Отбор проб во всех случаях производился в соответствии со следующими нормативными документами: РД 52.04.186-89, М 02-14-2007, М 02-09-2005, РД 52.04.823-2015, РД 52.04.794-2014, ГОСТ Р ИСО 16017-1-2007, ПНД Ф 13.1.2.3.25-99, ПНД Ф 13.1.2.3.23-98, паспорт ЭКИТ 5.940.0000, руководство по эксплуатации анализатора пыли DustTrak.

Для всех частиц был определен гранулометрический (размер в мкм), морфологический (внешние признаки, определяющиеся происхождением части-

цы) и химический (химические элементы, составляющие частицу) состав.

Исследование морфологических характеристик и определение элементного (химического) состава (процентного содержания каждого химического элемента в отдельной частице) отобранных образцов проводилось с привлечением специалистов Пермского национального исследовательского политехнического университета с использованием сканирующего электронного микроскопа высокого разрешения S-3400N фирмы «Hitachi», оснащенного энергодисперсионным спектрометром XFlash Detektor 4010 фирмы «Bruker» (степень увеличения 5—300 000). Для определения гранулометрического и морфологического состава (распределения частиц по размеру, форме и содержанию углерода) был использован анализатор Mastersizer компании «Malvern Instruments».

В течение 2017—2018 гг. на территории Мурманска в одних и тех же характерных 25 точках (см. рис. 1) на высоте 1,5 м над земной поверхностью проводился отбор проб атмосферного воздуха:

- с 17 по 19 декабря 2017 г. (I серия);
- с 26 по 28 февраля и с 1 по 2 марта 2018 г. (II серия);
- с 16 по 20 июля 2018 г. (III серия).

Помимо информации о расположении точек отбора проб на рис. 1 содержится информация о розе ветров (в верхнем левом углу), о расположении источников выбросов загрязняющих веществ (порты перегрузки угля (Мурманский морской торговый порт — ММТП), ТЭЦ, пути перемещения железнодорожного транспорта) и постов наблюдения за загрязнением атмосферного воздуха сети Росгидромета.

Согласно розе ветров, полученной при исследовании метеорежима в [10] и приведенной на рис. 1, в Мурманске преобладающим направлением ветра зимой является южное направление, а летом — северное.

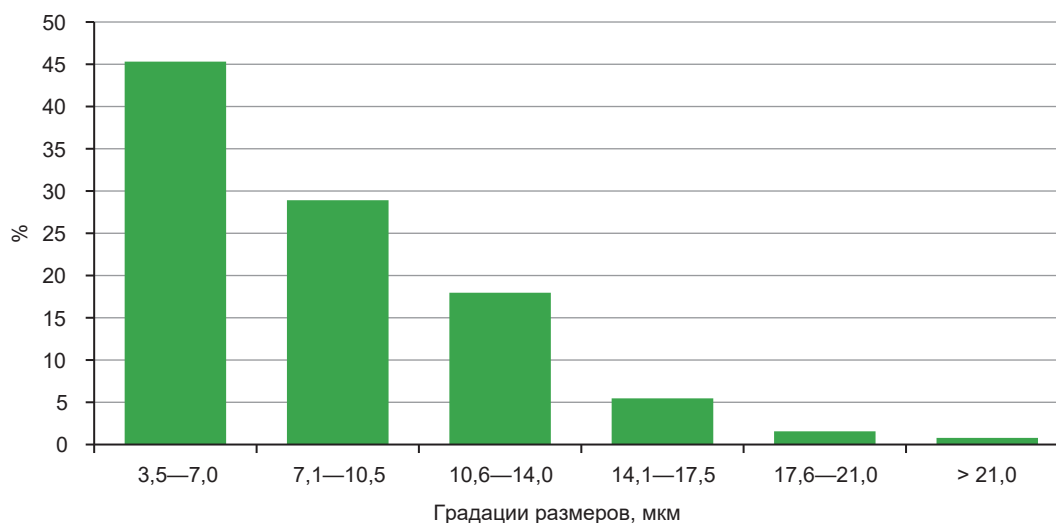
Выбор точек отбора проб (характерных точек) основан на результатах анализа планировки Мурманска, розы ветров и жалоб населения. Сводные расчеты загрязнения атмосферного воздуха в городе в настоящее время не проводятся. Поэтому привести количественные описания источников выбросов ввиду их отношения к различным объектам, находящимся в собственности и/или эксплуатации отдельных организаций, в настоящее время не представляется возможным. Заказчиком работы были предоставлены расчеты рассеивания выбросов, которые (точки максимума) также были учтены при выборе характерных точек.

Результаты

В ходе исследования, направленного на выявление источников загрязнения атмосферы в Мурманске и полей загрязнения воздуха, создаваемых такими источниками, в каждой из трех серий измерений было

Таблица 1. Характеристики частиц угольной пыли, кокса, сажи, золы и прочих безуглеродных частиц

| Подгруппа | Содержание углерода, % | Количество других химических элементов | Размер, мкм |
|------------------------------|------------------------|--|-------------|
| Угольная пыль | 43,54—93,12 | 4—12 | 3,5—20,0 |
| Кокс | 83,47—92,85 | 2—3 | 3,6—14,3 |
| Сажа | 71,76—90,55 | 4—7 | 8,0—117,5 |
| Зола | 0,00 | 3—11 | 1,3—9,0 |
| Прочие безуглеродные частицы | 0,00 | 3—14 | 0,9—27,0 |

**Рис. 2. Распределение размеров углеродсодержащих частиц по градациям, %**
Fig. 2. Size distribution of carbon-containing particles by gradations, %

отобрано 25 проб в одних и тех же точках. В каждой серии все частицы по результатам химического анализа были разделены на углеродсодержащие и безуглеродные частицы. Такое деление связано с тем, что содержание в рассматриваемых частицах углерода предположительно должно указывать на источники выбросов, из которых в данную точку были принесены загрязняющие вещества. По результатам совместного рассмотрения формы частицы и процентного содержания в ней углерода, определенного по результатам анализа, частицы были классифицированы на пять подгрупп: три подгруппы углеродсодержащих и две подгруппы безуглеродных частиц.

Углеродсодержащие частицы были разделены на три подгруппы по характерному морфологическому и химическому составу: частицы угольной пыли (40—94% углерода), частицы кокса (83—92% углерода) и частицы сажи (частицы округлой формы при любом содержании углерода). Причиной округлой формы частиц сажи является воздействие высоких температур. У частиц других формы и цвета иное происхождение, например частицы угольной пыли образуются посредством измельчения более круп-

ных частиц механическим и физическим способами, поэтому имеют угловатую форму и более светлый цвет на фотоизображениях.

Безуглеродные частицы были разделены на две подгруппы по характерному морфологическому и химическому составу: частицы золы (округлой формы) и прочие частицы. Причиной округлой формы частиц золы также является воздействие высоких температур, а частицы другой формы, например частицы подсыпки для дорог, образуются посредством измельчения более крупных частиц механическим или физическим способами, поэтому имеют угловатую форму и острые грани.

Характеристика безуглеродных частиц в настоящей публикации не рассматривается, поскольку в рамках исследования имело значение перемещение именно углеродсодержащих частиц, так как источники их выбросов, к которым относятся порты перегрузки угля, ТЭЦ, железнодорожный транспорт, имеют четкое территориальное расположение.

Обобщенные гранулометрические (размер) и химические (содержание углерода в %, количество других химических элементов) характеристики рас-

Таблица 2. Частота возникновения инверсий в отдельные месяцы года

| Месяц | Число дней с инверсией | | | | | |
|---------|------------------------|------|-----------|------|-------------|------|
| | Все типы | | Приземные | | Приподнятые | |
| | День | Ночь | День | Ночь | День | Ночь |
| Декабрь | 25 | 22 | 16 | 15 | 9 | 7 |
| Январь | 26 | 26 | 21 | 20 | 5 | 6 |
| Февраль | 23 | 26 | 13 | 24 | 10 | 2 |
| Март | 7 | 27 | 4 | 20 | 3 | 7 |
| Июль | 3 | 30 | 0 | 20 | 3 | 10 |

смотренных частиц для пяти подгрупп представлены в табл. 1.

Фотоизображения отобранных из атмосферного воздуха частиц, сведения о распределении всех отобранных частиц по гранулометрическому составу и подробный химический анализ выявленных частиц в данной публикации привести невозможно, прежде всего из-за большого объема информации, а также поскольку эти сведения являются предметом отдельных публикаций.

Средний размер рассмотренных углеродсодержащих частиц составляет 9,1 мкм при дисперсии, равной 104 мкм². Процентное содержание количества углеродсодержащих частиц по шести грациям размеров приведены на рис. 2.

Обсуждение

Анализ гранулометрического состава показывает, что около половины частиц имеют небольшие размеры, следовательно, могут переноситься достаточно далеко от источников эмиссии.

Погодные условия Мурманска, определяющие перенос загрязняющих веществ, включая аэрозоль, зависят от географического положения, особенностей подстилающей поверхности, рельефа. Согласно выполненным ранее исследованиям, географическое положение города влияет на формирование циркуляционных климатических особенностей, включая поле ветра, температурного и влажностного режима [11]. Наличие вытянутого не замерзающего зимой Кольского залива, температура которого может существенно отличаться от температуры воздуха в городе, создает бризовые эффекты. Они начинают проявляться при наличии антициклонального или малоградиентного поля и приводят к смене направления ветра в течение суток.

Еще одна особенность, влияющая на температурный режим Мурманска, под влиянием которого формируются условия распространения примесей, связана с солнечной радиацией. Со 2 декабря по 11 января наступает полярная ночь, а с 22 мая по 22 июля — полярный день. При отсутствии коротко-

волновой радиации или ее существенном уменьшении зимой происходит охлаждение поверхности за счет увеличения эффективного излучения, что приводит к формированию приземных инверсий. Они возникают не только в ночное, но и в дневное время. Так, в декабре 2017 г. и январе 2018 г. число дней с дневными приземными инверсиями составляло соответственно 16 и 21 (табл. 2). Кроме того, днем наблюдалось значительное число приподнятых инверсий, а общее число дней с дневными инверсиями составило 51 за два зимних месяца, а с

ночными — 49. Приподнятые инверсии в зимнее время формируются за счет эффекта «острова тепла» в городе, а в Мурманске еще и благодаря более теплой водной поверхности Кольского залива.

В марте днем частота инверсий, особенно приземных, уменьшается в связи с увеличением дневного прогрева. В июне-июле, в период полярного дня, когда высота Солнца максимальна, приземные инверсии днем разрушаются либо переходят в приподнятые, а ночные инверсии в связи с незначительным поступлением солнечной радиации в это время еще сохраняются. Наличие температурных инверсий способствует ослаблению турбулентного переноса в подынверсионном слое и препятствует рассеиванию вредных примесей.

Значительная мощность инверсионного слоя зимой сохраняется и в дневное время (табл. 3). В этот период глубина приземных инверсий наибольшая. Это способствует сохранению газообразных примесей в воздухе, а аэрозоль поступает на земную поверхность вследствие оседания со скоростью, зависящей от размеров и плотности частиц. При небольших скоростях ветра, которые часто сопровождают инверсии, перенос аэрозоля происходит на небольшие расстояния.

Еще один фактор, способствующий сохранению инверсий, связан с особенностями рельефа. Город расположен вдоль вытянутого с севера на юг залива и окружен холмами с высотами 150—300 м, что способствует ослаблению ветра за исключением направления вдоль залива. При таком направлении ветра возможно его усиление, что разрушает инверсии. В июне-июле, когда увеличиваются температурные контрасты между водной поверхностью и суши, развивается бризовая циркуляция. Как указано в [11], днем направление ветра в городе на берегу Кольского залива чаще западное, а вечером и ночью — восточное. При радиационном охлаждении ночью воздух с вершин холмов стекает к заливу, что усиливает бризовую циркуляцию. Такие процессы наблюдаются при антициклональном барическом поле или в барической седловине.

Как правило, в летнее время при антициклональном типе барического поля дневные и ночные профили ветра существенно различаются. В приземном слое ночью скорость ветра меньше, чем днем, а выше уровня обращения ветра — наоборот, ночью скорость ветра на высоте несколько сотен метров больше, чем днем (рис. 3). Это способствует более интенсивному рассеиванию загрязняющих веществ днем и ослаблению этого процесса ночью. Однако в нашем случае, когда ветер у подстилающей поверхности отсутствовал, застойные ситуации не наблюдались, что связано с микроклиматическими особенностями, перечисленными выше.

Дополнительно к аэрологическим данным использовались результаты метеонаблюдений. В первую очередь были рассмотрены скорости и направления ветра, далее — синоптические ситуации и связанные с ними возможные наличия инверсий температуры, поскольку именно эти параметры в первую очередь влияют на рассеивание примесей в атмосферном воздухе [12—13].

В Мурманске синоптическая ситуация и метеоусловия у поверхности земли в дни отбора проб атмосферного воздуха сильно различались.

Информация о метеорологических и синоптических условиях в периоды отбора проб представлена в табл. 4. При отборе проб I серии преобладающая скорость ветра у поверхности земли составляла 5

Таблица 3. Характеристики приземных инверсий, формирующихся в разное время суток

| Месяц | День | | Ночь | |
|---------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | Мощность, м | Глубина, °С | Мощность, м | Глубина, °С |
| Декабрь | 430 | 3,8 | 430 | 6,9 |
| Январь | 360 | 5 | 330 | 4,8 |
| Февраль | 445 | 4,6 | 385 | 5 |
| Март | 80 | 0,5 | 205 | 1,9 |
| Июль | — | — | 375 | 3,1 |

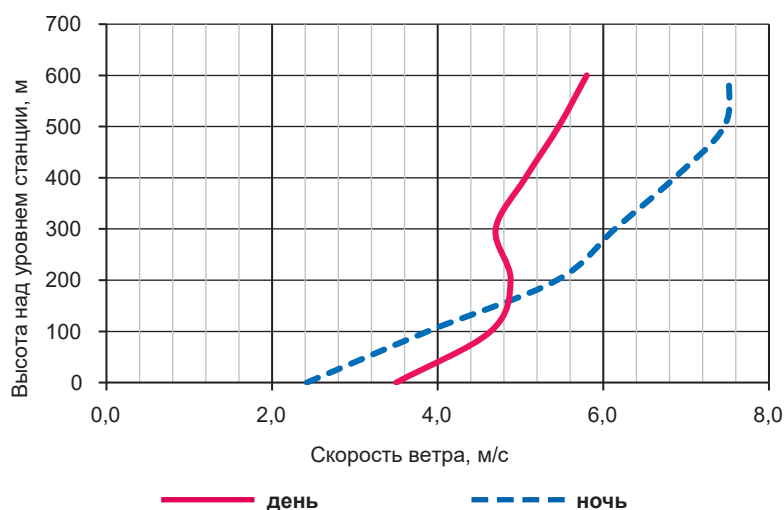


Рис. 3. Средние профили ветра в период проведения третьей серии наблюдений. Составлено авторами по данным weather.uwyo.edu

Fig. 3. Average wind profiles during the third series of observations. Compiled by the authors according to weather.uwyo.edu

м/с, II серии — 1—6 м/с в зависимости от даты отбора проб. Ветер южный, юго-юго-западный. Роза ветров по направлениям и скоростям ветра, составленная авторами, приведена на рис. 4. Временами

Таблица 4. Информация о метеорологических и синоптических условиях в периоды отбора проб

| Характеристика | I серия | II серия | III серия |
|-----------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---|
| Температура воздуха, °С | –11...–6 | –7...–12 | +19...+35 |
| Преобладающая скорость ветра, м/с | 5 | 1—6 | 3—4 |
| Преобладающее направление ветра | Ю, ЮЮЗ | Ю, ЮЮЗ | ЮЮВ, Ю, штиль |
| Осадки | Временами небольшой снег; без осадков | Временами небольшой снег; без осадков | Без осадков |
| Синоптическая ситуация | Циклон | Информация отсутствует | Малоградиентное барическое поле, антициклон |

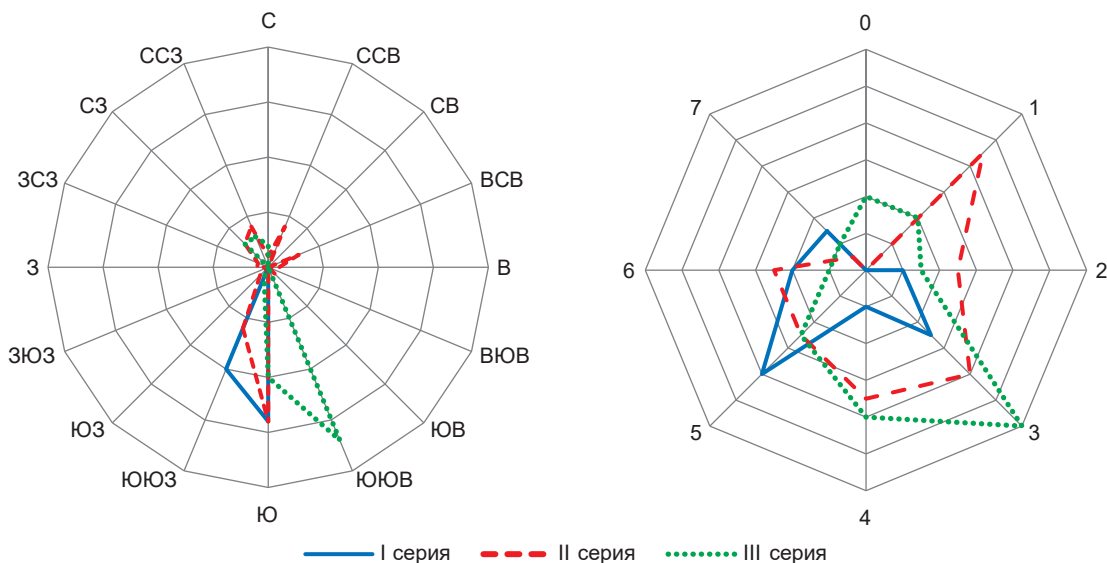


Рис. 4. Роза ветров по направлениям (слева) и скоростям (справа) ветра для каждой серии отбора проб. Составлено авторами по данным rp5.ru

Fig.4. Wind rose by directions (left) and speeds (right) of the wind for each sampling series. Compiled by the authors according to rp5.ru

наблюдался небольшой снег или осадки отсутствовали. Согласно данным Мурманского управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (УГМС) [14], во второй декаде декабря в регионе преобладал циклонический характер погоды. Обзор синоптических условий для периода II серии отбора проб Мурманским УГМС в свободном доступе не публиковался. Среднедекадная температура воздуха была значительно выше декадной нормы. Однако в целом наблюдавшиеся метеоусловия в дни отбора проб I и II серий являлись типичными для данной территории.

В дни, соответствующие III серии отбора проб, наблюдался преимущественно слабый ветер южного и юго-юго-восточного направлений (3—4 м/с) или штиль. Осадков не наблюдалось. Согласно данным Мурманского УГМС [14], во второй декаде июля Мурманская область находилась в малоградиентном барическом поле и под влиянием антициклона, сформировавшегося над Кольским полуостровом, а затем сместившегося на юго-восток Баренцева моря. Температура воздуха в дни отбора проб III серии была выше климатических значений. Ветровой режим в целом был типичным для данной территории. Среднедекадная температура воздуха значительно превышала декадную норму.

Так как по мере удаления от земной поверхности влияние силы трения на ветер ослабевает, значения скорости и направления ветра на высоте могут отличаться от значений у поверхности земли. Для оценки степени поворота ветра с высотой в пограничном слое были проанализированы данные радиозондирования о скоростях ветра на высотах 300 и 600 м за декабрь 2017 г., февраль и июль 2018 г.

Розы ветров для указанных периодов у поверхности и на высотах 300 и 600 м представлены на рис. 5.

У земной поверхности направление ветра представлено достаточно узким сектором, т. е. ветер дует вдоль Кольского залива. Таким образом, распространение примесей в атмосфере также происходит вдоль Кольского залива. Влияние рельефа сказывается на поле ветра тем сильнее, чем меньше скорость ветра. С увеличением высоты роза ветров становится несколько шире, а преобладающее направление ветра изменяется (правый поворот). В этом случае проявляется влияние рельефа, так как при достаточно больших изменениях направления ветра на высоте такое влияние у земной поверхности существенно не меняется и соответствует направлению вдоль залива. В этом случае более мелкие частицы примесей, которые поднимаются на более высокие уровни, будут распространяться на большей территории, не ограниченной особенностями рельефа. Тогда селитебные территории Мурманска будут подвергаться влиянию источников загрязнения твердыми частицами. У поверхности земли ветер переносит более тяжелые примеси вдоль Кольского залива — в более низменной части города.

Согласно данным [15—17], метеоусловия, характеризующиеся сильным ветром, как в случае I и II серий отбора проб, должны способствовать рассеиванию примесей в атмосферном воздухе и переносу аэрозоля на значительные расстояния. Следовательно, источник загрязнения воздуха мог находиться на большем удалении от точки наблюдения, чем при слабом ветре. В этом случае перенос примеси происходит в приземном слое. Метеоусловия, характеризующиеся слабым ветром или шти-

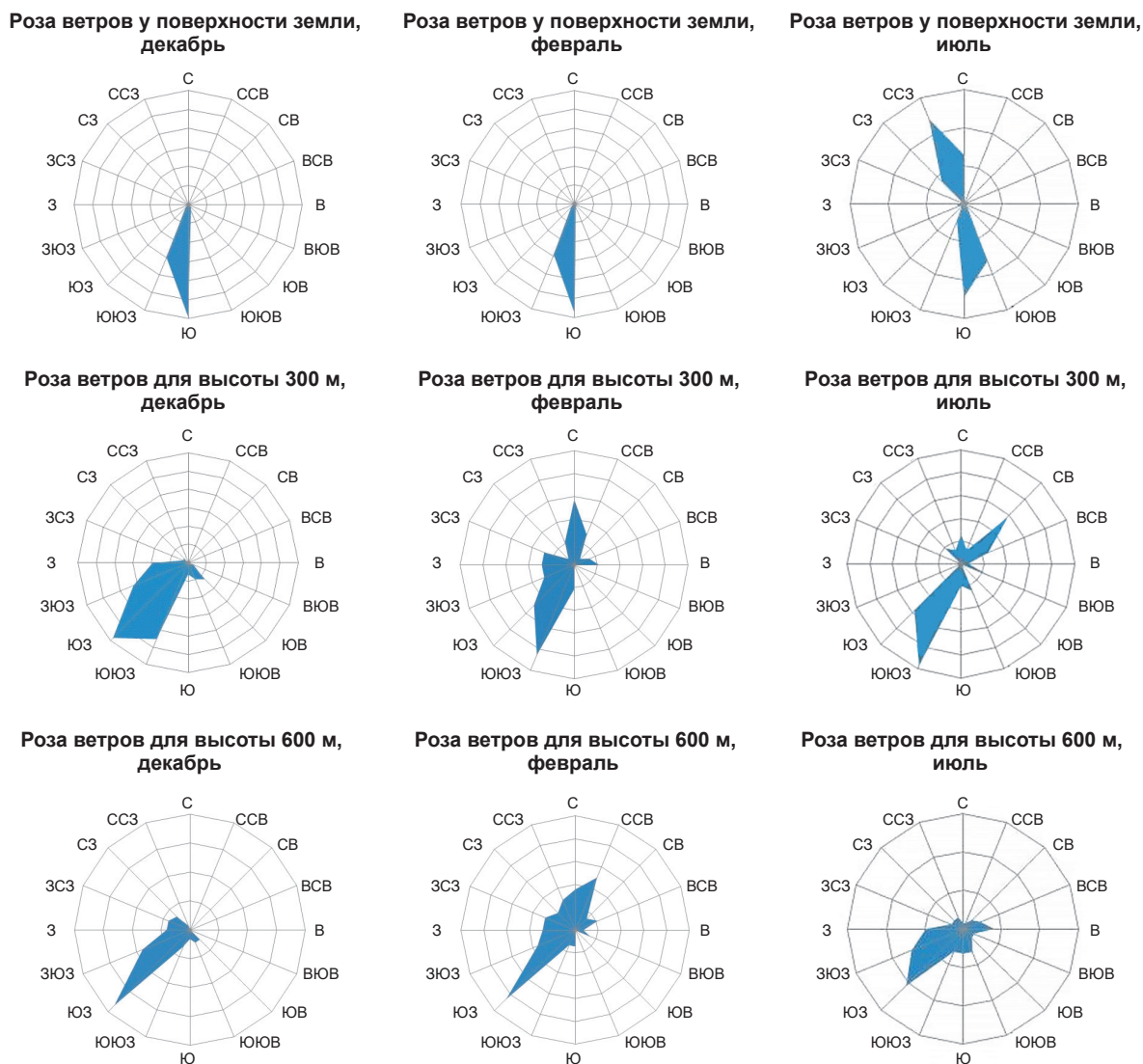


Рис. 5. Розы ветров для приземного уровня, высоты 300 м, 600 м за декабрь 2017 г., февраль и июль 2018 г.

Составлено авторами по данным weather.uwyo.edu

Fig. 5. Wind roses for the surface level, height 300 m, 600 m for December 2017, February and July 2018.

Compiled by the authors according to weather.uwyo.edu

лем, как в случае III серии отбора проб, напротив, должны были способствовать застойным явлениям и, следовательно, отражать влияние источников загрязнения атмосферы, находящихся вблизи точки отбора проб. Однако бризовые эффекты, возникающие в летнее время, кроме увеличения скоростей ветра способствуют перераспределению направления переноса аэрозоля.

Так, наличие относительно большого количества углеродсодержащих частиц в III серии отбора проб по сравнению с количеством таких частиц в I и II сериях в одних и тех же точках указывает на то, что во всех случаях при малых скоростях ветра происходило накопление частиц вблизи низких и наземных источников выбросов, расположенных вдоль Кольского залива, в том числе порта, где происходит перегрузка угля. Важно, что повышение concentra-

ций углеродсодержащих частиц в пробах III серии отмечено в летний период, когда ТЭЦ и котельные города не работали, и в прогреве двигателей автотранспорта также не было необходимости. Следовательно, выброс углеродсодержащих частиц сажи в летний период был минимальным.

Однако рост количества углеродсодержащих частиц в пробах III серии по сравнению с холодным периодом года можно объяснить ночными приземными инверсиями и небольшими скоростями ветра. Тогда при затрудненном рассеивании выбросов в ночное время происходит локальное гравиметрическое осаждение частиц вблизи источников выбросов из-за отсутствия их переноса на значительные расстояния. Этот факт подтверждает тезис о том, что метеорологические и климатические условия могут перекрывать по значимости количе-

ство и мощность выбросов источников загрязнения атмосферы [5].

Следует отметить, что в соответствии с исследованиями [18], проведенными в 1980—2020 гг., в Мурманске прослеживалась тенденция к снижению риска для здоровья населения от загрязнения атмосферы с точки зрения влияния погодного-климатического фактора (более чем на 20%).

По результатам анализа отобранных проб атмосферного воздуха и метеорологических условий точки отбора проб были условно разделены на четыре группы:

- точки, для которых при любых метеоусловиях содержание углеродных частиц в атмосферном воздухе мало, не более 20% углеродсодержащих частиц в пробе, — десять точек (№ 2, 4, 5, 8, 9, 13, 14, 17, 19, 23);
- точки, для которых большее количество углеродсодержащих частиц отмечено при слабом ветре (влияние близко расположенных источников): при ветре более 2,5 м/с — от 0% до 20% углеродсодержащих частиц; при ветре менее 2,5 м/с — от 25% до 64% углеродсодержащих частиц, — пять точек (№ 1, 3, 6, 15, 16);
- точка, для которой изменение направления ветра коррелирует с изменением количества углеродсодержащих частиц, — точка № 7 (резкое увеличение количества углеродсодержащих частиц от 0% при юго-западном ветре до 36% при южном ветре);
- точки, для которых связь количества углеродсодержащих частиц с метеоусловиями явно не прослеживается, — девять точек (№ 10—12, 18, 20—22, 24, 25).

Расположение точек отбора проб, условные обозначения которых показывают принадлежность к одной из указанных четырех групп, представлено на рис. 1.

Интервалы процентного содержания углеродсодержащих частиц в пробах указанных групп определены на основе наблюдавшихся фактических значений.

Анализ результатов показал, что далеко не во всех точках отбора проб атмосферного воздуха можно однозначно проследить зависимость между количеством углеродсодержащих частиц в пробе, скоростью и направлением ветра. Помимо метеорологических имеются и другие факторы, влияющие на рассеивание примесей в определенных частях города. Такими факторами, например, могут быть рельеф местности (перепад высот на территории Мурманска составляет от 0 до 305,9 м), а также характерное для города расположение многоэтажных и протяженных домов в виде амфитеатра, что может приводить к возникновению около домов зон с различными аэродинамическими характеристиками.

Натурные измерения подтверждают зависимость рассеивания примесей от местных особенностей, связанных с рельефом местности, типом подстила-

ющей поверхности и застройкой, что свидетельствует о необходимости учитывать эти особенности при размещении постов наблюдения за загрязнением атмосферного воздуха.

Как видно из рис. 1, ПНЗ № 8 расположен в центре города в жилой зоне между тремя точками отбора проб, а именно 250 м до точки № 12, 200 м до точки № 13, 370 м до точки № 14. Точка № 12 относится к таким, в которых связь количества углеродсодержащих частиц с метеоусловиями явно не прослеживается, а точки № 13 и 14 — к таким, в которых при любых метеоусловиях содержание углеродных частиц в атмосферном воздухе мало. При этом точки, в которых большее количество углеродных частиц отмечено при слабом ветре (влияние близко расположенных источников), и точки, в которых изменение направления ветра коррелирует с изменением количества углеродсодержащих частиц, рассредоточены в разных направлениях и на разных расстояниях от ПНЗ № 8. Например, ближайшие точки, в которых большее количество углеродных частиц отмечено при слабом ветре, находятся от ПНЗ № 8 на расстоянии 750 м в северо-западном направлении (точка № 16), на расстоянии 950 м в юго-западном направлении (точка № 6).

Исходя из вывода о расположении действующих в Мурманске ПНЗ и результатов анализа проб атмосферного воздуха в близлежащих к ПНЗ точках, можно предположить, что для наиболее эффективной оценки изменения полей концентраций загрязняющих веществ, на которые оказывают влияние метеорологические и другие условия, необходима модернизация существующей сети мониторинга загрязнения атмосферного воздуха. Схему модернизации сети ПНЗ необходимо разрабатывать с учетом требований РД 52.04.186-89 «Руководство по контролю загрязнения атмосферы» [19], дополнительно желательно воспользоваться рекомендациями, сформулированными в [20; 21].

Возможной причиной образования «черного налета» на снегу и фасадах зданий может являться не только угольное загрязнение, но и сажа, образующаяся при сжигании мазута, на котором работают три крупных ТЭЦ (Центральная, Южная и Восточная котельные, расположенные на территории Мурманска) и мелкие котельные, находящиеся по большей части за территорией Мурманска [22] (продолжительность отопительного периода в Мурманске в среднем составляет девять месяцев), а также автотранспорт (точки отбора проб выбирались вдали от автотранспортных магистралей). На рис. 1 указано расположение основных потенциальных источников выбросов углеродсодержащих частиц — возможных источников «черного налета».

Заключение

Выводы, сделанные по результатам рассмотренных в статье исследований, представляют ценность именно для Мурманска, так как в период исследо-

ваний и в настоящее время в городе имело и имеет место загрязнение атмосферного воздуха, вызывающее «черный налет» на снегу и фасадах зданий, причина которого в то время не была выявлена и изучена. Поэтому поиск причин и зависимостей, позволяющих получить фактические и логически обоснованные сведения для изучения состава и рассеивания твердых примесей в воздухе города в зависимости от особенностей его метеорологических условий и рельефа, имеет большое значение.

Результаты исследования загрязнения атмосферного воздуха твердыми частицами в разные периоды года и при разных метеорологических условиях позволяют сделать ряд практических выводов. Прежде всего, в точке расположения ПНЗ № 8 из-за наличия особенностей застройки и локальных циркуляционных особенностей потоков воздуха концентрация загрязняющих веществ практически не зависит от направления и скорости ветра, а результаты замеров в этой точке можно использовать скорее в качестве фоновых показателей для локальной территории, однако для установления зависимостей между количеством углеродсодержащих частиц в пробах атмосферного воздуха, скоростью и направлением ветра данные ПНЗ № 8 не являются показательными.

Сделать однозначные выводы об эффективности выявления и оценки источников выбросов твердых частиц по данным ПНЗ № 12 и 15, которые расположены в отдаленных от центра частях города, в ходе рассматриваемого исследования не представилось возможным.

В качестве одного из вариантов модернизации сети ПНЗ можно рассмотреть установление еще двух стационарных ПНЗ или в крайнем случае маршрутных постов наблюдения дополнительно к уже имеющимся на территории Мурманска постам наблюдения (предполагаемые ПНЗ обозначены на рис. 1 звездочкой). При установке ПНЗ в первую очередь необходимо обратить внимание на территории города, от жителей которых чаще всего поступают жалобы, в том числе на наличие «черного налета» на снегу и фасадах зданий, что позволило бы углубить исследования состава и распространения твердых частиц. Хотя предлагаемые решения по дополнению существующей схемы мониторинга атмосферного воздуха в Мурманске кажутся очевидными, каких-либо планов или работ в этом направлении в настоящее время нет.

В качестве одного из потенциальных мест размещения поста наблюдения можно рассматривать территорию восточнее Памятника защитникам Советского Заполярья в годы Великой Отечественной войны («Алеша»). Этот выбор обосновывается прежде всего характерным рельефом местности: восточнее памятника находится склон с подветренной стороны относительно источников выбросов, расположенных вдоль Кольского залива. Поэтому зимой при южном ветре воздушные потоки, содержащие

выбросы от портовых сооружений и железной дороги, могут переносить твердые частицы на эту территорию, где при определенных метеорологических условиях неизбежны застои воздуха, которые должны способствовать накоплению и выпадению твердых частиц.

Для места расположения второго поста наблюдения можно предложить пересечение проспекта Ленина и улицы Карла Маркса как точку, в которой изменение направления ветра коррелирует с изменением количества углеродсодержащих частиц. Наблюдения в этой точке позволят по морфологическому и химическому анализу частиц в пробах более точно идентифицировать источники их выбросов.

Литература

1. Берлянд М. Е. Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы. — Л.: Гидрометеиздат, 1985. — 272 с.
2. Берлянд М. Е. Исследование атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы // Современные исследования Главной геофизической обсерватории. — Т. 2. — СПб.: Гидрометеиздат, 2001. — С. 117—145.
3. Генихович Е. Л., Берлянд М. Е., Оникул Р. И. Развитие теории атмосферной диффузии как основа для разработки атмосфероохранных мероприятий // Современные исследования Главной геофизической обсерватории. — Т. 1. — СПб.: Гидрометеиздат, 1999. — С. 99—126.
4. Состояние загрязнения атмосферы в городах на территории России за 2018 г.: Ежегодник. — СПб.: ФБГУ «ГГО» Росгидромета, 2019. — 251 с.
5. Безуглая Э. Ю. Метеорологический потенциал и климатические особенности загрязнения воздуха городов. — Л.: Гидрометеиздат, 1980. — 182 с.
6. Безуглая Э. Ю., Завадская Е. К., Ивлева Т. П. Роль климатических условий в формировании изменений загрязнения атмосферы // Тр. Глав. геофиз. обсерватории им. А. И. Воейкова. — 2013. — № 568. — С. 267—279.
7. Безуглая Э. Ю., Расторгуева Г. П., Смирнова И. В. Чем дышит промышленный город. — Л.: Гидрометеиздат, 1991. — 251 с.
8. Климатические характеристики условий распространения примесей в атмосфере / Под ред. Э. Ю. Безуглой, М. Е. Берлянда. — Л.: Гидрометеиздат, 1983. — 328 с.
9. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Мурманской области в 2018 году» / М-во природ. ресурсов и экологии Мурман. обл. — URL: https://mpr.gov-murman.ru/upload/iblock/4a3/Doklad_zh-2018-god_28-05-2019_ITOG.pdf.
10. Опутин И. П., Шкляев В. А. Загрязнение воздуха в Мурманске и его связь с погодными условиями // Цифровая география: Материалы Всероссийской научно-практической конференции, г. Пермь,

- 16—18 сентября 2020 г. — Т. 1. — Пермь: ПГНИУ, 2020. — С. 419—423.
11. Яковлев Б. А. Климат Мурманска. — Л.: Гидрометеиздат, 1972. — 106 с.
12. Шкляев В. А., Костарева Т. В. Характеристики температурных инверсий и их связь с загрязнением атмосферного воздуха в г. Перми // Геогр. вестн. — 2019. — № 1 (48). — С. 84—92.
13. Шкляев В. А., Шкляева Л. С. Исследование инверсий нижней атмосферы по результатам наблюдений температурного профиломера и радиозондирования // Геогр. вестн. — 2014. — № 4 (31). — С. 62—66.
14. Обзор метеорологических условий за декабрь / Мурманское УГМС. — URL: <http://kolgimet.ru/obzor-meteorologicheskikh-uslovii-za-avgust/obzor-meteorologicheskikh-uslovii-za-2017/?type=rss1/>.
15. Шварц К. Г., Шкляев В. А. Математическое моделирование мезомасштабных и крупномасштабных процессов переноса примеси в бароклинной атмосфере. — Ижевск: Инст. компьютер. исслед., 2015. — 156 с.
16. Экология атмосферы крупного промышленного центра в условиях сложного рельефа / Под ред. Л. М. Фетисовой, П. А. Пужляковой и др. — Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 2004. — 130 с.
17. Опутина И. П. Уровень загрязнения атмосферного воздуха в городе Магнитогорске и его связь с метеорологическими условиями // Приоритетные направления развития науки и технологий: Доклады XXVI международной научно-практической конференции. — Тула: Инновац. технологии, 2019. — С. 54—57.
18. Маюско А. А., Матешева А. В. К оценке экологических рисков от загрязнения атмосферы Арктической зоны в условиях изменяющегося климата в XXI в. // Арктика: экология и экономика. — 2022. — Т. 12, № 1. — С. 34—45. — DOI: 10.25283/2223-4594-2022-1-34-45.
19. РД 52.04.186-89 Руководство по контролю загрязнения атмосферы. — Утв. Госкомгидрометом СССР, главным государственным санитарным врачом СССР 1 июня 1989 г. — URL: https://medecol.ru/doc/rd_52_04_186_89.pdf.
20. Опутина И. П. Возможности оптимизации системы мониторинга атмосферного воздуха в Магнитогорске // Цифровая география: Материалы Всероссийской научно-практической конференции, г. Пермь, 16—18 сентября 2020 г.: В 2 т. — Т. 1. — Пермь: ПГНИУ, 2020. — С. 416—418.
21. Опутина И. П., Сорокина Т. В. Характеристика состояния атмосферного воздуха в городе Магнитогорске для усовершенствования системы мониторинга // Проблемы антропогенной трансформации природной среды: Материалы международной конференции, 14—15 ноября 2019 г. / Под ред. С. А. Бузмакова. — Пермь: ПГНИУ, 2019. — С. 198—200.
22. Схема и программа развития электроэнергетики Мурманской области на период 2018—2022 гг. — Распоряжение губернатора Мурманской области от 26 апреля 2017 г. № 63-ПГ. — URL: http://energy.csti.yar.ru/documents/51/5120170049_1_rasporyazhenie_63-rg_ot_26.04.2017.pdf.

Информация об авторах

Опутина Ирина Павловна, научный сотрудник, отдел прикладной экологии, ФГБУ УралНИИ «Экология» (614039, Российская Федерация, Пермь, Комсомольский просп., д. 61а), e-mail: oputinaip@ecologyperm.ru.

Шкляев Владимир Александрович, кандидат географических наук, доцент, профессор кафедры метеорологии и охраны атмосферы, ФГБОУ Пермский государственный национальный исследовательский университет (614990, Российская Федерация, Пермь, ул. Букирева, д. 15), научный сотрудник, отдел прикладной экологии, ФГБУ УралНИИ «Экология» (614039, Российская Федерация, Пермь, Комсомольский просп., 61а), e-mail: shklyaeavl@yandex.ru.

Костылева Наталья Валерьевна, кандидат технических наук, начальник отдела прикладной экологии, ФГБУ УралНИИ «Экология» (614039, Российская Федерация, Пермь, Комсомольский просп., 61а), доцент, кафедра биогеоценологии и охраны природы, ФГБОУ Пермский государственный национальный исследовательский университет (614990, Российская Федерация, Пермь, ул. Букирева, д. 15), e-mail: nkost@ecologyperm.ru.

Библиографическое описание данной статьи

Опутина И. П., Шкляев В. А., Костылева Н. В. Твердые частицы как индикатор размещения постов наблюдения за загрязнением атмосферы в Мурманске // Арктика: экология и экономика. — 2022. — Т. 12, № 4. — С. 598—610. — DOI: 10.25283/2223-4594-2022-4-598-610.

SOLID PARTICLES AS AN INDICATOR OF THE PLACEMENT OF AIR POLLUTION MONITORING POSTS IN MURMANSK

Oputina, I. P.

FSBI UralNII "Ecology" (Perm, Russian Federation)

Shklyayev, V. A.

FSBEI Perm State University, FSBI UralNII "Ecology" (Perm, Russian Federation)

Kostyleva, N. V.

FSBI UralNII "Ecology", Perm State University (Perm, Russian Federation)

The article was received on December 29, 2021

Abstract

The article presents the results of field measurements and analysis of atmospheric air samples at 25 characteristic points on the territory of Murmansk in 2017—2018. For all particles taken from atmospheric air the researchers determine the granulometric, morphological and chemical composition using a high-resolution scanning electron microscope S-3400N Hitachi. They consider meteorological conditions as of the dates of sampling from the point of view of their effect on the dispersion of pollutants. The results made it possible to preliminarily determine the regions on the territory of Murmansk that are most and least dependent on meteorological conditions, as well as to formulate recommendations for improving the atmospheric air monitoring network in Murmansk.

Keywords: *air pollution, scanning electron microscope, transport of impurities in the atmosphere.*

References

1. Berlyand M. E. Forecast and regulation of atmospheric pollution. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1985, 272 p.
2. Berlyand M. E. Investigation of atmospheric diffusion and atmospheric pollution. Modern research of the Main Geophysical Observatory. Vol. 2. St. Petersburg, Gidrometeoizdat, 2001, pp. 117—145.
3. Genikhovich E. L., Berlyand M. E., Onikul R. I. Development of the theory of atmospheric diffusion as a basis for the development of atmospheric protection measures. Vol. 1. Modern research of the Main Geophysical Observatory. St. Petersburg, Gidrometeoizdat, 1999, pp. 99—126.
4. State of air pollution in cities on the territory of Russia for 2018: Yearbook. St. Petersburg, FBGU "GGO" of Roshydromet, 2019, 251 p.
5. Bezuglaya E. U. Meteorological potential and climatic features of urban air pollution. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1980, 182 p.
6. Bezuglaya E. U., Zavadskaya E. K., Ivleva T. P. The role of climatic conditions in the formation of changes in atmospheric pollution. Proceedings of the A. I. Voeikov Main Geophysical Observatory, 2013, no. 568, pp. 267—279.
7. Bezuglaya E. U., Rastorgueva G. P., Smirnov I. V. What the industrial city breathes. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1991, 251 p.
8. Climatic characteristics of the conditions for the propagation of impurities in the atmosphere. Ed. E. U. Bezuglaya, M. E. Berland. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1983, 328 p.
9. State report "On the state and environmental protection of the Murmansk region in 2018". Ministry of natural resources and ecology of the Murmansk region. Available at: https://mpr.gov-murman.ru/upload/iblock/4a3/Doklad_zh-2018-god_28-05-2019_ITOG.pdf.
10. Oputina I. P., Shklyayev V. A. Air pollution in Murmansk and its relationship with weather conditions. Digital geography: materials of All-Russian scientific-practical conferences, Perm, September 16—18, 2020. Vol. 1. Perm, PSU, 2020, pp. 419—423.
11. Yakovlev B. A. The Climate of Murmansk. Leningrad, Gidrometeorologiya, 1972, 106 p.
12. Shklyayev V. A., Kostareva T. V. Characteristics of temperature inversions and their relationship with atmospheric air pollution in the city of Perm. Geographic Bull., 2019, no. 1 (48), pp. 84—92.
13. Shklyayev V. A., Shklyayeva L. S. Investigation of inversions of the lower atmosphere based on the results of observations of the temperature profiler and radio sounding. Geographic Bull., 2014, no. 4 (31), pp. 62—66.
14. Review of meteorological conditions for December. Murmansk UGMS. Available at: <http://kolgimet.ru/obzor-meteorologicheskikh-uslovii-za-avgust/obzor-meteorologicheskikh-uslovii-za-2017/?type=rss1/>.
15. Schwartz K. G., Shklyayev V. A. Mathematical modeling of mesoscale and large-scale processes of impurity transport in a baroclinic atmosphere. Izhevsk, Inst. of Computer Research, 2015, 156 p.
16. Ecology of the atmosphere of a large industrial center in a complex relief. Ed. by L. M. Fetisova, P. A. Puzhlyakova et al. Saratov, Saratov Univ. Publishing House, 2004, 130 p.
17. Oputina I. P. The level of atmospheric air pollution in the city of Magnitogorsk and its relationship with

meteorological conditions. Priority directions of development of science and technology: reports of the XXVI international scientific-practical conference. Tula, Innovative technologies, 2019, pp. 54—57.

18. Makosko A. A., Matesheva A. V. On the assessment of environmental risks from air pollution in the Arctic zone under a changing climate in the XXI century. *Arktika: ekologiya i ekonomika*. [Arctic: Ecology and Economy], 2022, vol. 12, no. 1, pp. 34—45. DOI: 10.25283/2223-4594-2022-1-34-45.

19. RD 52.04.186-89 Guidelines for the control of air pollution. Approved by Goskomhydromet of the USSR, Chief State Sanitary Doctor of the USSR dated 06.01.1989. Available at: https://medecol.ru/doc/rd_52_04_186_89.pdf.

20. Oputina I. P. Possibilities of optimization of the atmospheric air monitoring system in Magnitogorsk. Dig-

ital geography: materials of the All-Russian scientific and practical conference, Perm, September 16—18, 2020, in 2 vol. Vol. 1. Perm, PSU, 2020, pp. 416—418.

21. Oputina I. P., Sorokina T. V. Characteristics of the state of atmospheric air in the city of Magnitogorsk to improve the monitoring system. Problems of anthropogenic transformation of the natural environment: proceedings of the international conference, November 14—15, 2019. Ed. by S. A. Buzmakov. Perm, PSU, 2019, pp. 198—200.

22. Scheme and program for the development of the electric power industry of the Murmansk region for the period 2018—2022. Order of the Governor of the Murmansk region dated April 26, 2017 no. 63-RG. Available at: http://energy.csti.yar.ru/documents/51/5120170049_1_rasporyazhenie_63-rg_ot_26.04.2017.pdf.

Information about the authors

Oputina, I. P., Researcher, Department of Applied Ecology FSBI UralNII “Ecology” (614039, Russian Federation, Perm, Komsomolsky Avenue, 61a), e-mail: oputinaip@ecologyperm.ru.

Shklyayev, V. A., PhD of Geography, Professor of the Department of Meteorology and Atmospheric Protection FSBEI Perm State University (614990, Russian Federation, Perm, Bukireva st., 15), Researcher Department of Applied FSBI UralNII “Ecology” (614039, Russian Federation, Perm, Komsomolsky Avenue, 61a), e-mail: shklyayevv@yandex.ru.

Kostyleva, N. V., PhD of Engineering, Head of the Department of Applied Ecology of the FSBI UralNII “Ecology” (614039, Russian Federation, Perm, Komsomolsky Avenue, 61a), Associate Professor of the Department of Biogeocenology and Nature Protection of the FSBEI Perm State University (614990, Russian Federation, Perm, Bukireva st., 15), e-mail: nkost@ecologyperm.ru.

Bibliographic description of the article

Oputina, I. P., Shklyayev, V. A., Kostyleva N. V. Solid particles as an indicator of the placement of air pollution monitoring posts in Murmansk. *Arktika: ekologiya i ekonomika*. [Arctic: Ecology and Economy], 2022, vol. 12, no. 4, pp. 598—610. DOI: 10.25283/2223-4594-2022-4-598-610.

© Oputina I. P., Shklyayev V. A., Kostyleva N. V., 2022