

УДК 551.510.41

## Черный углерод в приземном воздухе в районе Печоро-Ильчского заповедника: измерения и источники

А.А. Виноградова<sup>1</sup>, В.М. Копейкин<sup>1</sup>, Н.С. Смирнов<sup>2</sup>,  
А.В. Васильева<sup>1</sup>, Ю.А. Иванова<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН  
119017, г. Москва, Пыжевский пер., 3

<sup>2</sup>Печоро-Ильчский государственный природный биосферный заповедник  
169436, Республика Коми, Троицко-Печорский р-н, пос. Якша, ул. Ланиной, 8

Поступила в редакцию 18.01.2019 г.

Новые данные об уровне содержания черного углерода (BC) в атмосфере получены при круглогодичном ежедневном мониторинге концентрации BC в приземном воздухе труднодоступного района Северного Урала (на территории Печоро-Ильчского природного заповедника) с временным разрешением 1 сут. Проведен анализ результатов за холодное полугодие (с октября 2017 г. по март 2018 г.), когда в атмосфере присутствует только BC антропогенного происхождения, а влияние пожаров исключено. Средние концентрации BC (плюс-минус стандартное отклонение) составляют  $(296 \pm 172)$  и  $(175 \pm 82)$  нг/м<sup>3</sup> в приземном воздухе в пос. Якша и вне его соответственно. Сравнение среднемесячных значений концентрации BC в приземном воздухе с ее оценками по данным спутниковых наблюдений (<https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>) показывает удовлетворительное соответствие, что можно считать их взаимной верификацией и подтверждением достоверности результатов. Анализ траекторий дальнего переноса воздушных масс и BC позволил выделить для района Печоро-Ильчского заповедника основные антропогенные источники BC в атмосфере, расположенные на расстояниях менее 500 км от него на территориях промышленного Среднего Урала, районов добычи углеродсодержащего топлива ЯНАО и ХМАО, в городах и поселках Пермского края, Удмуртии, Республики Коми.

**Ключевые слова:** атмосфера, приземный слой, загрязнение, черный углерод, непрерывный мониторинг, Печоро-Ильчский заповедник, антропогенные источники; atmosphere, surface layer, air pollution, monitoring, Pechora-Ilych nature reserve, black carbon.

### Введение

Изучение процессов антропогенного загрязнения природных экосистем удаленных территорий чрезвычайно важно как для понимания механизмов природных явлений, так и с точки зрения оценки состояния окружающей среды, выявления источников и минимизации последствий загрязнения. Черный углерод (black carbon, BC) — один из короткоживущих климатически значимых компонентов атмосферы [1] — образуется в результате неполного сгорания углеродсодержащих веществ, в частности органического топлива. В холодную часть года источники BC в атмосфере преимущественно антропогенные (отопление, транспорт, энергетика и т.д.), тогда как летом к ним добавляются природные пожары, сильно модулирующие поле эмиссий BC как

в пространстве, так и в разные месяцы и годы. Влияние атмосферного BC на климат обусловлено поглощением черными частицами солнечной радиации (прямые радиационные эффекты) и его физическими и химическими свойствами, меняющими состав и микрофизику атмосферы (косвенные эффекты) [2]. Многообразие физических механизмов эмиссии BC в атмосферу, а также атмосферных процессов, определяющих эффективность его распространения и влияния на радиационный баланс, делает этот феномен чрезвычайно сложным для понимания, математического описания и оценок [3]. Все это задает мотивацию исследований BC в атмосфере, его эмиссий и дальнего переноса, измерений и оценок его содержания в воздухе различных районов.

В 2000-е гг. существенно увеличилось количество районов, где проводятся измерения концентрации BC в атмосфере, включая как труднодоступные (преимущественно арктические) [4], так и городские [5–7] территории. Наблюдения в зарубежной Арктике ведутся непрерывно уже несколько десятков лет (ст. «Алерт», «Бэрроу» и др.). В России

\* Анна Александровна Виноградова (anvinograd@yandex.ru); Владимир Михайлович Копейкин (kopeikin@ifaran.ru); Николай Сергеевич Смирнов (niksersmirnov@gmail.com); Анастасия Васильевна Васильева (av@ifaran.ru); Юлия Алексеевна Иванова (ulia\_sml@mail.ru).

не так много точек, где мониторинг ВС осуществляется круглогодично (Москва [8], Томск [9], Тикси [10, 11]), чаще измерения проводятся в ходе экспедиционных работ различной длительности (максимум 1–2 мес) [2, 12, 13]. О степени загрязнения атмосферы черным углеродом можно также судить, оценивая потоки ВС из атмосферы на поверхность, по его содержанию в снеге [14, 15]. Кроме того, в последние годы очень расширилась сеть спутникового мониторинга параметров и состава атмосферы, выходные данные которой теперь включают и содержание ВС в приземной атмосфере [16].

В настоящей работе приводятся и обсуждаются первые результаты непрерывного мониторинга концентрации ВС в приземной атмосфере в условно фоновом (в смысле антропогенного воздействия) районе центральной России, на территории Печоро-Ильчского государственного природного биосферного заповедника (в юго-западной части Северного Урала), полученные в течение шести холодных месяцев (октябрь 2017 г. – март 2018 г.), когда эмиссии от пожаров исключены. Анализ измерений сопровождается модельными расчетами концентрации ВС с учетом направлений переноса воздуха к пункту наблюдений и пространственного распределения антропогенных эмиссий ВС с территории России. Результаты измерений сравниваются с данными, полученными в других районах России и мира, а также с оценками по информации со спутников.

### Пункт наблюдений, методы и подходы

Работы начались 21.09.2017 г. в пос. Якша на территории Печоро-Ильчского государственного природного биосферного заповедника (далее – ПИГПБЗ), примыкающего с запада к той части Уральских гор, которая относится к Северному Уралу (севернее 59° с.ш.), вдали от крупных промышленных центров и больших городов. Примерное положение района исследований показано на карте рис. 1. Климат этого района довольно суров – снег лежит больше полугода (с середины октября почти до конца апреля), средняя температура воздуха в январе –17,6 °С, в июле +16,5 °С.

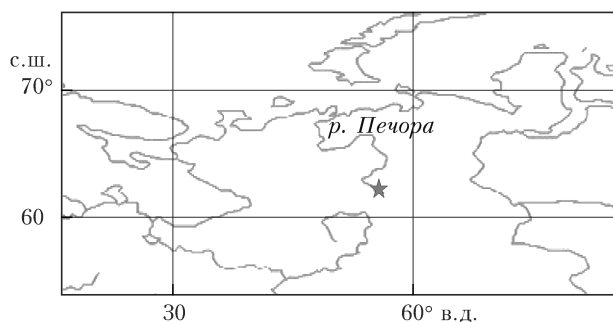


Рис. 1. Положение пункта наблюдений (звездочка) на карте

Пробоотборник атмосферного аэрозоля сначала был установлен непосредственно в пос. Якша в точ-

ке с координатами (61,822144° с.ш., 56,842309° в.д.). Затем, примерно через 2 мес, пункт отбора проб был перенесен восточнее на 1,8 км в ближайший лесной массив (61,820296° с.ш., 56,872233° в.д.). Высота размещения воздухозаборника над землей в обоих случаях составляла ~2–3 м.

Пробы отбираются путем непрерывного прокачивания воздуха через перхлорвиниловые фильтры АФА-ХП-20, каждая в течение суток; смена фильтра производится около 08:00 по местному времени. Для обеспечения нормальной работы пробоотборника при отрицательной температуре он помещен в обогреваемый контейнер; забор воздуха на фильтр происходит на расстоянии 1,5 м от контейнера.

Определение массы черного углерода, собранного на фильтр, производится в Москве фотометром, разработанным в ИФА РАН, с погрешностью не более 20%, по ослаблению экспонированным фильтром излучения в красной области спектра (0,6–0,8 мкм) [8, 17].

Параллельно с измерениями концентрации ВС проводились модельные оценки этого показателя для района пункта наблюдений по методике статистики траекторий движения воздуха, подробно описанной в [18]. Для каждой пробы аэрозоля в течение суток рассчитывались восемь траекторий (через 3 ч) длительностью по 120 ч с использованием архива метеоданных REANALYSIS и программ HYSPLIT на сайте [19]. Концентрация ВС рассчитывалась с учетом пространственного распределения антропогенных источников выбросов ВС в атмосферу ([20], где включены эмиссии ВС от бытовых и промышленных устройств и предприятий энергетики, транспорта и факелов сжигания попутного газа при добыче углеводородного сырья [21]). Для изучаемого района скорость осаждения ВС на поверхность в холодное полугодие принималась равной 0,67 см/с [18]. Пространственное разрешение этих расчетов 1° × 1° по широте и долготе. Зона влияния источников эмиссий ВС (при 5-суточных траекториях переноса) охватывала территорию с географическими координатами в пределах (52–72)° с.ш., (46–66)° в.д.

Распределение средних (за месяц) эмиссий ВС в атмосферу от антропогенных источников показано на рис. 2, а; это распределение считалось неизменным в течение шести холодных месяцев. На рис. 2, б приведена диаграмма распределения эмиссий ВС по секторам, соответствующим стандартным сторонам света (север, восток, юг и запад).

Необходимо помнить, что площади рассматриваемых секторов различны в соответствии с широтными изменениями длины параллелей: площади восточного и равного ему западного секторов примерно в 2,1 раза, а южного в 2,4 раза больше площади северного сектора.

### Измерения и модельные оценки приземной концентрации ВС

Средние (для каждого месяца и в целом за полугодие) распределения направлений поступления

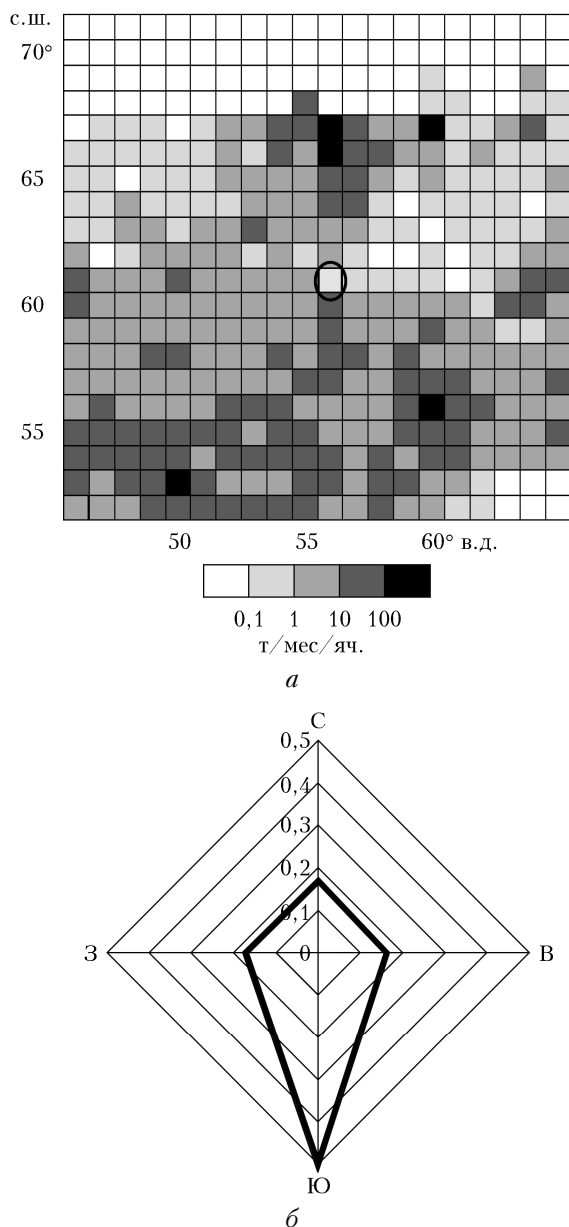


Рис. 2. Пространственное распределение мощности антропогенных эмиссий ВС в атмосферу в центре России: в среднем за 2010–2014 гг. на географической сетке  $1^\circ \times 1^\circ$  (а); по сторонам света относительно пункта отбора проб (ячейка, выделенная кружком на рис. 2, а) (б)

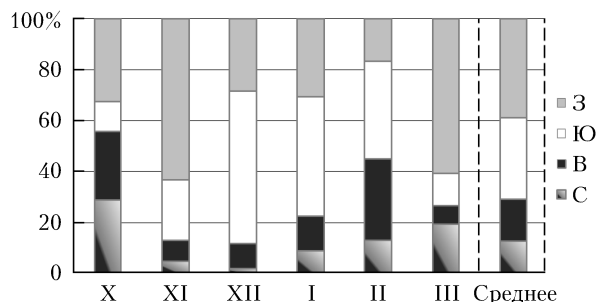


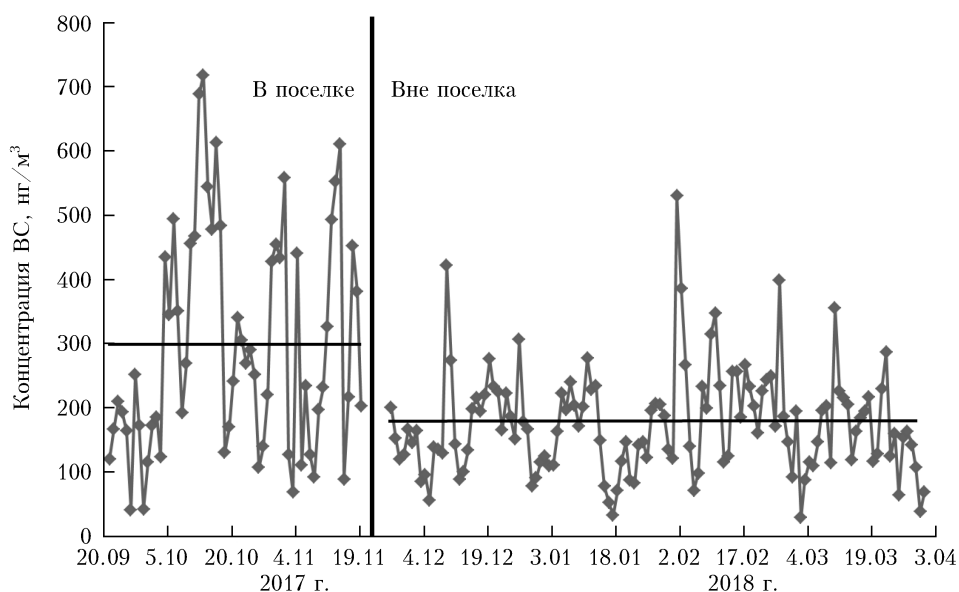
Рис. 3. Средние (за каждый месяц и за полугодие) распределения воздушных масс, поступающих к району отбора проб, по сторонам света

воздушных масс к пункту отбора аэрозольных проб показаны на диаграмме на рис. 3. В целом воздух в пункт наблюдений поступал преимущественно из западного и южного секторов, из двух других секторов — примерно вдвое реже. Однако условия циркуляции атмосферы сильно менялись от месяца к месяцу. Именно вариации процессов циркуляции атмосферы, при условии постоянства пространственного распределения мощностей источников эмиссии ВС в атмосферу (рис. 2), определяют колебания значений концентрации ВС в пункте наблюдений.

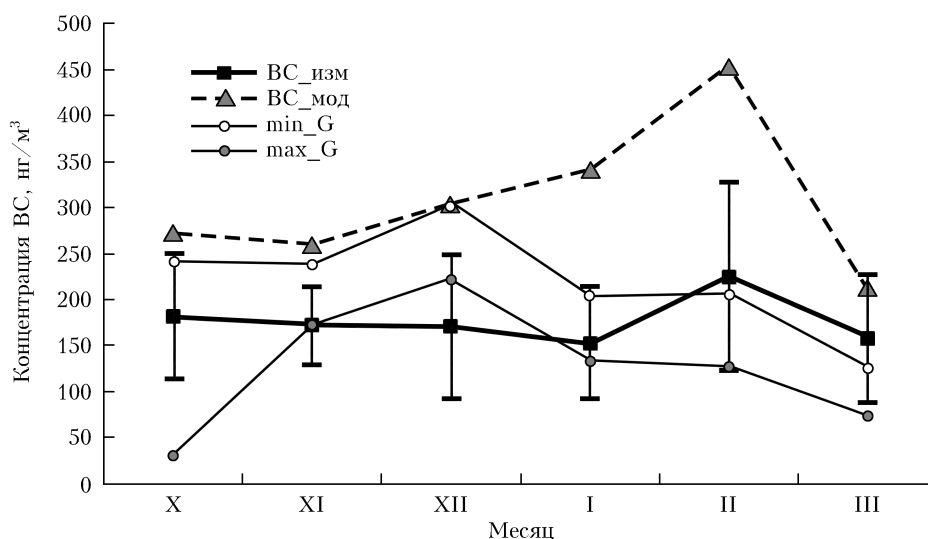
На рис. 4, а приведены результаты ежедневных измерений концентрации ВС в приземном воздухе в районе пос. Якша. Рисунок разделен на две области: наблюдения в поселке и вне его. Видно, что уровень загрязнения атмосферы черным углеродом в самом поселке выше. Средние (за первые 2 и последующие 4 мес) значения плюс-минус стандартное отклонение составляют  $(296 \pm 172)$  и  $(175 \pm 82)$   $\text{нг}/\text{м}^3$  соответственно. Достоверность различия этих значений около 90% (по критерию Стьюдента). Разницу в загрязнении воздуха черным углеродом в холодное время года между двумя пунктами ( $\sim 120$   $\text{нг}/\text{м}^3$ ) можно объяснить вкладом местных источников ВС, расположенных в самом поселке, где отопление дровяное.

Модельные оценки концентрации ВС в приземном воздухе в рассматриваемом районе выполнялись по такой схеме. Концентрация ВС в пункте наблюдений, созданная в результате выбросов примеси  $Q_{ij}$  в атмосферу в ячейке сетки  $1^\circ \times 1^\circ$  с географическими координатами  $(ij)$ , вычисляется по формуле  $C_{ij} = Q_{ij} \cdot Z_{ij}$ , где  $Z_{ij}$  — функция чувствительности к потенциальным источникам ВС, расположенным в ячейке  $(ij)$ . Величины  $Z$  для ячеек выбранной сетки рассчитываются по массиву обратных траекторий и зависят не только от количества траекторий, прошедших через ячейку  $(ij)$ , но и от качества поверхности, над которой происходит перенос примеси, а также от характеристик атмосферы по пути переноса (высота слоя перемешивания, осадки), длины пути и длительности переноса (подробнее см. в [18]). Рассчитывалась средняя концентрация ВС для каждого дня в течение 6 мес (с пропуском 5 сут при перемещении прибора в другую точку). Коэффициент корреляции между рассчитанными и измеренными среднесуточными концентрациями ВС составил 0,31 — значимая величина (на уровне 99%) для 180 пар значений.

Для тех дней, когда измеренные значения концентрации ВС в воздухе были близки к максимальным и модельные оценки также были наибольшими, рассматривались наиболее важные источники антропогенного черного углерода в пункте наблюдений. Для ПИГПБЗ это промышленные районы севера Свердловской обл. (Нижний Тагил, Красноуральск, Ревда, Алапаевски др.) и Пермского края (Березники, Краснокамск, Соликамск, Красновишерск и др.), северо-западные районы ХМАО и ЯНАО (города Салехард, Воркута, Нягань, Нарьян-Мар и др.), а также факелы сжигания попутного газа при добыче нефти и газа), города и поселки Республики Коми (Троице-



*a*



*б*

Рис. 4. Концентрация ВС в приземном воздухе пункта наблюдений: ежедневные измерения (вертикальная линия – время изменения положения точки отбора проб, горизонтальные – средние значения для разных точек пробоотбора) (*a*); средние за месяц: измеренные (со стандартными отклонениями), модельные и спутниковые данные (min\_G и max\_G) (*б*)

Печорск, Ухта, Сыктывкар и др.). Изредка в район наблюдений черный углерод поступает от источников, находящихся в Удмуртии и Татарстане.

По рис. 4, б можно сопоставить средние (за каждый месяц) измеренные и рассчитанные значения концентрации ВС. Здесь для наглядности результаты измерений для первых двух месяцев уменьшены на 120 нг/м<sup>3</sup>, учитывая предполагаемое влияние поселка. Заметим, что обе точки наблюдений расположены в одной расчетной ячейке, поэтому модель их не различает. Видно, что модельные оценки выше измеренных величин, но общий ход зависимостей качественно похож. Мы считаем, что расхождения могут быть обусловлены недостатками алгоритма расчетов, а именно слишком крупной сеткой, на которой производятся вычисления. Горизонтальный

размер антропогенных источников (городов, отдельных промышленных комплексов) заведомо меньше размеров ячейки сетки (~111 км/град по меридиану и 72 (38) км/град по параллели на 70° (50°) с.ш.). В результате реальный воздушный поток, пересекая площадь ячейки, может не подхватить выбросы находящегося в другой ее части источника, хотя в расчетах эта траектория будет учтена как несущая загрязнение. Эта гипотеза будет проверяться в дальнейшем путем улучшения пространственного разрешения алгоритма модельных оценок.

Интересно сравнить полученные результаты измерений ВС в пункте наблюдений со спутниковыми данными [30]. Разброс спутниковых оценок также приведен на рис. 4, б (маркировка G). Результаты сходятся в целом очень неплохо: средние (по 6 мес)

максимальные и минимальные значения совпадают в пределах стандартных отклонений. Это можно считать взаимной верификацией спутниковых и измеренных данных и подтверждением их достоверности. Таким образом, для оценок сезонных и межгодовых вариаций концентрации ВС в приземной атмосфере может использоваться спутниковая информация [30].

Таблица дает представление о различиях в уровне загрязнения атмосферы черным углеродом в разных пунктах земного шара. Понятно, что в городах содержание ВС в воздухе в 10 и более раз выше, чем вне населенных пунктов и в удаленных районах Арктики. Значительны также территориальные и сезонные различия, что связано с различными источниками ВС, разными метеорологическими и циркуляционными условиями в атмосфере. В межгодовых вариациях большую роль играют природные пожары теплого полугодия, расположение и интенсивность которых сильно отличаются в разные годы.

Результаты измерений концентрации ВС в приземном воздухе ПИГПБЗ, которые обсуждаются в данной работе, хорошо вписываются в общую картину распределения этого показателя по территории России.

## Заключение

Создана новая точка круглогодичного ежедневного мониторинга концентрации ВС в приземном воздухе в труднодоступном районе Северного Урала (на территории Печоро-Ильчского природного заповедника). Здесь получены новые данные об уровне содержания черного углерода в атмосфере этого района и его источниках с временным разрешением в 1 сут. Проведен анализ результатов за холодное полугодие (с октября 2017 г. по март 2018 г.), когда в атмосфере присутствует только ВС антропогенного происхождения, а влияние пожаров исключено. Средние концентрации ВС (плюс-минус стандартное отклонение) составляют  $(296 \pm 172)$  и  $(175 \pm 82)$  нг/м<sup>3</sup> в приземном воздухе в пос. Якша и вне его соответственно.

Рассчитанные по авторской модели оценки среднесуточных концентраций ВС в воздухе в районе пункта наблюдений дают качественно непротиворечивые, но несколько завышенные по сравнению с измеренными величинами результаты. Предложено совершенствование расчетов путем улучшения пространственного разрешения алгоритма модельных оценок и задаваемого пространственного поля эмиссий ВС в атмосферу, что будет проверяться

### Примеры результатов измерения концентрации ВС в воздухе в разных районах мира

Место	Время наблюдений	ВС, нг/м <sup>3</sup>	Источник
<i>Города</i>			
Гвадалахара, Мексика	2008 г.	1000–20000*	[7]
Пекин, Китай	осень 1996–2005 гг.	11000–28400	[6]
Москва	весна 2014 и 2016 гг.	3100**	[8]
Тюмень	осень 2005 г.	до 24000	[5]
Новосибирск	осень 2005 г.	до 21000	
Томск	1997–2008 гг.	500–2500	[9]
Якутск	холодные сезоны 1994–2003 гг.	3000–5000	[22]
<i>Средняя Россия, вне населенных пунктов</i>			
<b>Печоро-Ильчский ГПБЗ</b>	<b>октябрь 2017 г. – март 2018 г.</b>	<b>30–700</b>	<b>наши данные</b>
Новосибирская обл.	январь 2001 г.	5200*	[13]
Подмосковье	весна 2014 и 2016 гг.	900**	[8]
<i>Арктика</i>			
Тикси, Якутия	ноябрь – март 1994–2003 гг.	190**	[22]
	2012–2014 гг.	до 250*	[23]
	весна и осень 2014–2016 гг.	до 150*	[11]
Алерт, Канада	зима 1990–2007 гг.	100–120	[24]
Бэрроу, Аляска	январь – март 2008 г.	50–100	[25]
Шпицберген, Норвегия	январь – март 2002–2008 гг.	50–100	[26]
<i>Северные моря России</i>			
Баренцево	октябрь 1998 г.	100–980	[12]
Белое, Кандалакшский залив	август 2006 г.	10–900	[27]
Белое	несколько рейсов НИС	120–640	[28]
Карское	осень 2011 г.	до 200	[29]

\* Средние значения за месяц; \*\* средние за время наблюдений.

в дальнейшем. Сравнение результатов измерений с оценками по спутниковым наблюдениям (средне-месячные концентрации ВС в приземном воздухе) показывают удовлетворительное соответствие, что можно считать их взаимной верификацией и подтверждением достоверности.

Основные антропогенные источники ВС в атмосфере в районе Печоро-Илычского заповедника удалены от пункта наблюдений на расстояние не больше 500 км и расположены на территориях промышленного Среднего Урала, районов добычи углеродсодержащего топлива ЯНАО и ХМАО, в городах и поселках (с их промышленностью, транспортом и бытовым отоплением) Пермской обл., Удмуртии, Республики Коми. Результаты измерений концентрации ВС в приземном воздухе ПИГПБЗ, которые обсуждаются в данной работе, хорошо вписываются в общую картину распределения этого показателя по территории России.

Авторы благодарят организаторов сайта Лаборатории Воздушных Ресурсов за возможность свободно использовать модель HYSPLIT.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 17-05-00245).

1. AMAP Assessment 2015: Black carbon and ozone as Arctic climate forcers. Oslo, Norway: Arctic Monitoring and Assessment Programme, 2015. 116 p.
2. Панченко М.В., Журавлева Т.Б., Козлов В.С., Насртдинов И.М., Полькин В.В., Тертугова С.А., Чернов Д.Г. Оценка радиационных эффектов аэрозоля в фоновых и задымленных условиях атмосферы Сибири на основе эмпирических данных // Метеорол. и гидр. 2016. № 2. С. 45–54.
3. Bond T.C., Doherty S.J., Fahey D.W., Forster P.M., Berntsen T., DeAngelo B.J., Flanner M.G., Ghan S., Kärcher B., Koch D., Kinne S., Kondo Y., Quinn P.K., Sarofim M.C., Schultz M.G., Schulz M., Venkataraman C., Zhang H., Zhang S., Bellouin N., Guttikunda S.K., Hopke P.K., Jacobson M.Z., Kaiser J.W., Klimont Z., Lohmann U., Schwarz J.P., Shindell D., Storelmo T., Warren S.G., Zender C.S. Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment // J. Geophys. Res. Atmos. 2013. V. 118. P. 5380–5552.
4. Schmeisser L., Backman J., Ogren J.A., Andrews E., Asmi E., Starkweather S., Uttal T., Fiebig M., Sharma S., Eleftheriadis K., Vratolis S., Bergin M., Tunved P., Jefferson A. Seasonality of aerosol optical properties in the Arctic // Atmos. Chem. Phys. 2018. V. 18. P. 11599–11622.
5. Копейкин В.М. Наблюдение сажевого аэрозоля в атмосфере над Россией в международных экспедициях TROICA // Оптика атмосфер. и океана. 2007. Т. 20, № 7. С. 641–646.
6. Емиленко А.С., Копейкин В.М. Сравнение синхронных измерений концентрации сажи и субмикронного аэрозоля в регионах с различной степенью антропогенной нагрузки // Оптика атмосфер. и океана. 2009. Т. 22, № 6. С. 535–540; Emilenko A.S., Kopeikin V.M. Comparison of synchronous measurements of soot and submicron aerosol concentrations in regions with different anthropogenic loadings // Atmos. Ocean. Opt. 2009. V. 22, N 4. P. 421–427.
7. Limon-Sanchez M.T., Carbajal-Romero P., Hernandez-Mena L., Saldarriaga-Norena H., Lopez-Lopez A., Cosio-Ramirez R., Arriaga-Colina J.L., Smith W. Black carbon in PM<sub>2.5</sub>, data from two urban sites in Guadalajara, Mexico during 2008 // Atmos. Pollut. Res. 2011. V. 2. P. 358–365. DOI: 10.5094/APR.2011.040.
8. Копейкин В.М., Емиленко А.С., Исаков А.А., Лоскутова О.В., Пономарева Т.Я. Изменчивость сажевого и субмикронного аэрозоля в Московском регионе в 2014–2016 гг. // Оптика атмосфер. и океана. 2018. Т. 31, № 1. С. 5–10; Kopeikin V.M., Emilenko A.S., Isakov A.A., Loskutova O.V., Ponomareva T.Ya. Variability of soot and fine aerosol in the Moscow Region in 2014–2016 // Atmos. Ocean. Opt. 2018. V. 31, N 3. P. 243–249.
9. Козлов В.С., Панченко М.В., Яушева Е.П. Субмикронный аэрозоль и сажа приземного слоя в суточном ходе // Оптика атмосфер. и океана. 2010. Т. 23, № 7. С. 561–569; Kozlov V.S., Panchenko M.V., Yaushcheva E.P. Diurnal variations of the submicron aerosol and black carbon in the near-ground layer // Atmos. Ocean. Opt. 2011. V. 24, N 1. P. 30–38.
10. Макутас А.П., Уттал Т., Лаурилла Т., Парамонова Н.А. Гидрометеорологическая обсерватория Тикси (к пятилетию открытия) // Проблемы Арктики и Антарктики. 2015. № 2 (104). С. 5–12.
11. Popovicheva O., Diapouli E., Makshtas A., Shonija N., Manousakas M., Saraga D., Uttae T., Eleftheriadis K. East Siberian Arctic background and black carbon polluted aerosols at HMO Tiksi // Sci. Total Environ. 2019. V. 655. P. 924–938. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.11.165.
12. Копейкин В.М., Ретина И.А., Гречко Е.И., Огородников Б.И. Измерение содержания сажевого аэрозоля над водной поверхностью в Южном и Северном полушариях // Оптика атмосфер. и океана. 2010. Т. 23, № 6. С. 444–450; Kopeikin V.M., Retina I.A., Grechko E.I., Ogorodnikov B.I. Measurements of soot aerosol content in the near-water atmospheric layer in the southern and northern hemispheres // Atmos. Ocean. Opt. 2010. V. 23, N 6. P. 500–507.
13. Козлов В.С., Шмаргунов В.П., Панченко М.В. Сезонная изменчивость вертикальных профилей поглощающих характеристик субмикронного аэрозоля в тропосфере // Оптика атмосфер. и океана. 2009. Т. 22, № 7. С. 635–642.
14. Doherty S.J., Warren S.G., Grenfell T.C., Clarke A.D., Brandt R.E. Light-absorbing impurities in Arctic snow // Atmos. Chem. Phys. 2010. V. 10. P. 11647–11680.
15. Шевченко В.П., Куценогий К.П., Макаров В.И., Панченко М.В., Полькин В.В., Попова С.А., Новигатский А.Н. Аэрозоли // Система Белого моря. Т. II. Водная толща и взаимодействующие с ней атмосфера, криосфера, речной сток и биосфера. М.: Научный мир, 2012. С. 50–69.
16. Aker J.G., Leptoukh G. Online analysis enhances use of NASA Earth science data // Eos., Trans. AGU. V. 88, N 2. P. 14–17.
17. Hansen A.D.A., Rosen H., Novakov T. The aethalometer—an instrument for real-time measurement of optical absorption by aerosol particles // Sci. Total Environ. 1984. V. 36, N 1. P. 191–196.
18. Виноградова А.А. Дистанционная оценка влияния загрязнения атмосферы на удаленные территории // Геофизические процессы и биосфера. 2014. Т. 13, № 4. С. 5–20.
19. Air Quality Engineering & Climate Studies Research Group [Electronic resource]. URL: <http://acs.engr.utk.edu/Data.php> (last access: 11.02.2019).
20. Air Resources Laboratory [Electronic resource]. URL: <https://www.arl.noaa.gov> (last access: 11.02.2019).
21. Huang K., Fu J.S., Prikhodko V.Y., Storey J.M., Romanov A., Hodson E.L., Cresko J., Morozova I., Ignat

- tieva Y., Cabaniss J.* Russian anthropogenic black carbon: Emission reconstruction and Arctic black carbon simulation // *J. Geophys. Res. Atmos.* 2015. V. 120. DOI: 10.1002/2015JD023358.
22. *Макаров В.А., Охта С.* Органический и неорганический углерод в атмосферных аэрозолях Якутии // *Оптика атмосфер. и океана.* 2004. Т. 17, № 9. С. 774–778.
  23. *Виноградова А.А., Туткова Т.Б., Иванова Ю.А.* Эпизоды аномально высокой концентрации черного углерода в приземном воздухе в районе станции Тикси, Якутия // *Оптика атмосфер. и океана.* 2018. Т. 31, № 10. С. 837–844; *Vinogradova A.A., Titkova T.B., Ivanova Yu.A.* Episodes with anomalously high black carbon concentration in surface air in the region of Tiksi station, Yakutiya // *Atmos. Ocean. Opt.* 2019. V. 32, N 1. P. 94–102.
  24. *Gong S.L., Zhao T.L., Sharma S., Toom-Sauntry D., Lavoué D., Zhang X.B., Laitch W.R., Barrie L.A.* Identification of trends and interannual variability of sulfate and black carbon in the Canadian High Arctic: 1981–2007 // *J. Geophys. Res.* 2010. V. 115. DOI: 10.1029/2009JD012943.
  25. *Wang Q., Jacob D.J., Fisher J.A., Mao J., Leibensperger E.M., Carouge C.C., Le Sager P., Kondo Y., Jimenez J.L., Cubison M.J., Doherty S.J.* Sources of carbonaceous aerosols and deposited black carbon in the Arctic in winter–spring: Implications for radiative forcing // *Atmos. Chem. Phys.* 2011. V. 11. P. 12453–12473.
  26. *Eleftheriadis K., Vratolis S., Nyeki S.* Aerosol black carbon in the European Arctic: Measurements at Zeppelin station, Ny-Elesund, Svalbard from 1998–2007 // *Geophys. Res. Lett.* 2009. V. 36. DOI: 10.1029/2008GL035741.
  27. *Шевченко В.П., Стародымова Д.П., Виноградова А.А., Лисицын А.П., Макаров В.Н., Попова С.А., Сивонен В.В., Сивонен В.П.* Элементный и органический углерод в атмосферном аэрозоле над северо-западным побережьем Кандалакшского залива Белого моря // *Докл. РАН.* 2015. Т. 461, № 1. С. 1–5.
  28. *Козлов В.С., Тихомиров А.Б., Панченко М.В., Шмаргунов В.П., Польшкин В.В., Сакерин С.М., Лисицын А.П., Шевченко В.П.* Оптические и микрофизические характеристики аэрозоля в приводной атмосфере Белого моря по данным одновременных корабельных и береговых измерений в августе 2006 г. // *Оптика атмосфер. и океана.* 2009. Т. 22, № 8. С. 767–776; *Kozlov V.S., Tikhomirov A.B., Panchenko M.V., Shmargunov V.P., Pol'kin V.V., Sakerin S.M., Lisitzin A.P., Shevchenko V.P.* Optical and microphysical parameters of aerosol in the near-water atmosphere of the White Sea as assessed from the data of simultaneous ship-borne and coast-based measurements in August 2006 // *Atmos. Ocean. Opt.* 2009. V. 22, N 5. P. 517–526.
  29. *Stohl A., Klimont Z., Eckhardt S., Kupiainen K., Shevchenko V.P., Kopeikin V.M., Novigatsky A.N.* Black carbon in the Arctic: the underestimated role of gas flaring and residential combustion emissions // *Atmos. Chem. Phys.* 2013. V. 13, N 17. P. 8833–8855.
  30. *Access NASA Earth Science Data [Electronic resource].* URL: <https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni> (last access: 11.02.2019).

*A.A. Vinogradova, V.M. Kopeikin, N.S. Smirnov, A.V. Vasileva, Yu.A. Ivanova.* **Black carbon in surface air in the Pechora-Ilych nature reserve: measurements and sources.**

The new data on the surface atmospheric black carbon (BC) concentration derived from continuous daily sampling during October 2017 – March 2018, that is, cold half year without wildfires as BC sources, in the remote area of Pechora-Ilych Nature Biosphere Reserve are analyzed. Average BC concentrations (with standard deviations) are equal to  $(296 \pm 172)$  and  $(175 \pm 82)$  ng/m<sup>3</sup> for settlement Yaksha and in its neighborhood, respectively. Monthly average BC concentrations measured are compared with related monthly average satellite data (<https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>). A good agreement between them may be regarded as their inter-calibration and confirms the reliability of both result types. The analysis of air mass trajectories at the observation point shows the main anthropogenic BC sources to be situated at a distances of less than 500 km in industrial areas of the Central Urals, gas and oil production areas of Yamalo-Nenets and Khanty-Mansiysk Autonomous District, towns and settlements of Perm region, Udmurtia, and Komi Republic.