

Атмосферный перенос черного углерода в Российскую Арктику от различных источников (зима и лето 2000–2016 гг.)

А.А. Виноградова^{✉1,2}, Ю.А. Иванова^{1*}

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

²Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Северо-западное отделение
163013, г. Архангельск, Архангельская обл., Маймаксанское шоссе, 1, корп. 1

Поступила в редакцию 3.02.2023 г.;
после доработки 15.02.2023 г.;
принята к печати 3.04.2023 г.

На основе спутниковых данных о выбросах в атмосферу черного углерода (black carbon – BC) выполнены модельные оценки его концентрации в приземной атмосфере четырех районов Российской Арктики: на Кольском п-ове, в Архангельской обл., на территориях Ненецкого и Гыданского заповедников, зимой и летом 2000–2016 гг. Дальний перенос BC в атмосфере анализируется по авторской методике расчета функции чувствительности к потенциальным источникам субмикронного аэрозоля, основанной на статистике обратных траекторий движения воздушных масс. В целом вклады антропогенных источников в содержание BC в воздухе всех рассматриваемых районов преобладают над вкладами природных пожаров. Концентрация BC в приземном воздухе максимальна в районе Ненецкого заповедника и над акваторией Печорского моря, где основным источником этой примеси круглый год являются факелы сжигания попутного газа в ближайших крупнейших нефтегазовых провинциях России. Приведены средние, медианные и максимальные концентрации BC в приземном воздухе зимой и летом, рассчитанные по межгодовым вариациям этого показателя, которые обусловлены различиями циркуляции воздушных масс, переносящих примесь, а также пространственными и межгодовыми вариациями эмиссий BC от пожаров.

Ключевые слова: Российская Арктика, черный углерод, концентрация в приземной атмосфере, модельные расчеты, спутниковые данные об эмиссиях; Russian Arctic, black carbon (BC), near-surface atmosphere, model calculation, satellite data on BC emissions.

Введение

Черный углерод (black carbon – BC) как короткоживущая климатообразующая составляющая атмосферы изучается в течение последних двух десятилетий все более подробно: для разных территорий, по различным базам исходных данных, путем модельных расчетов и реальных наблюдений (см. наиболее свежие публикации [1–10]). BC – атмосферная примесь, оказывающая как прямое влияние на климат (поглощение солнечного излучения в атмосфере и на поверхности земли), так и косвенное – через изменение свойств облачности и радиационного баланса на разных уровнях атмосферы [1, 4]. Потепление климата особенно ярко проявляется в арктическом регионе и в значительной степени определяет потепление во всем Северном полушарии [1, 2, 4]. Многообразие физических механизмов эмиссии BC в атмосферу, а также природных

процессов, определяющих эффективность (дальность и скорость) его распространения и влияние на радиационный баланс, делает атмосферный черный углерод чрезвычайно сложным объектом для адекватного математического описания и оценок его климатического эффекта [4, 11]. Таким образом, актуальность исследования не вызывает сомнения.

Черный углерод попадает в атмосферу в результате неполного сгорания различных углеродсодержащих топлив, поэтому его физические источники весьма многообразны – от выбросов автомобилей и факелов сжигания попутного газа в местах добычи природных нефти и газа до лесных пожаров огромных масштабов [3, 4, 12]. Антропогенные эмиссии BC существуют круглый год и более или менее постоянны (в пределах сезонных изменений интенсивности процессов обогрева и транспорта), тогда как эмиссии от пожаров происходят только в теплое время года и очень изменчивы как во времени, так и в пространстве. Методики, обеспечивающие пересчет различной информации в данные о положении и мощности эмиссии BC в атмосферу,

* Анна Александровна Виноградова (anvinograd@yandex.ru); Юлия Алексеевна Иванова (ulia_sml@mail.ru).

сильно различаются, имеют разные погрешности, устаревают; базы этих данных каждый год совершенствуются, уточняются и обновляются [3, 12–14]. Ежегодно данные об эмиссии ВС в атмосферу становятся более достоверными, повышается их пространственное разрешение. В частности, регистрация эмиссии ВС практически от каждой факельной трубы позволяет более точно учитывать влияние на загрязнение атмосферы такого мощного и значимого для Северной Евразии источника как открытое сжигание попутного газа при добыче и транспортировке сырья для углеводородного топлива [14].

Настоящая работа является продолжением серии публикаций авторов (из последних — [15–20]), посвященных мониторингу загрязнения атмосферы Российской Арктики. Исследуемый временной ряд межгодовых вариаций концентрации ВС в приземном слое атмосферы северо-западных районов России охватывает 2010–2016 гг.

Цель настоящей работы — анализ сезонных (зима/лето) и пространственных различий эмиссии ВС, процессов его переноса и концентраций в приземном воздухе четырех районов Российской Арктики.

Материалы, методы и подходы

Пункты, для которых оценивается концентрация ВС в приземном слое атмосферы, расположены на Кольском п-ове (КП — 67° с.ш., 38° в.д.), в Архангельской обл. (АрхО — 62° с.ш., 48° в.д.), на территориях Ненецкого (НЗ — 67° с.ш., 53° в.д.) и Гыданского (ГЗ — 72,4° с.ш., 76,7° в.д.) заповедников (рис. 1). Как видно, пункт АрхО, строго говоря, не относится к арктическим районам РФ, однако он включен в анализ для понимания широтных различий в изучаемых процессах.

Перенос воздушных масс к рассматриваемым пунктам изучался по обратным траекториям их движения, рассчитанным на сайте ARL NOAA [21] по модели HYSPLIT [22]. Рассматривались ежедневные 5-суточные обратные траектории (старт в 00:00 UTC на высоте 100 м, шаг расчетов 1 ч) для января (зима) и июля (лето) каждого из годов (2000–2016 гг.). Анализ и визуализация результатов проводятся на географической сетке 1° × 1°.

Необходимо напомнить о заметном сдвиге к северу летом (по сравнению с зимой) арктического фронта, внутри которого перемещаются воздушные массы, поступающие в Арктику [23–25]. Так,

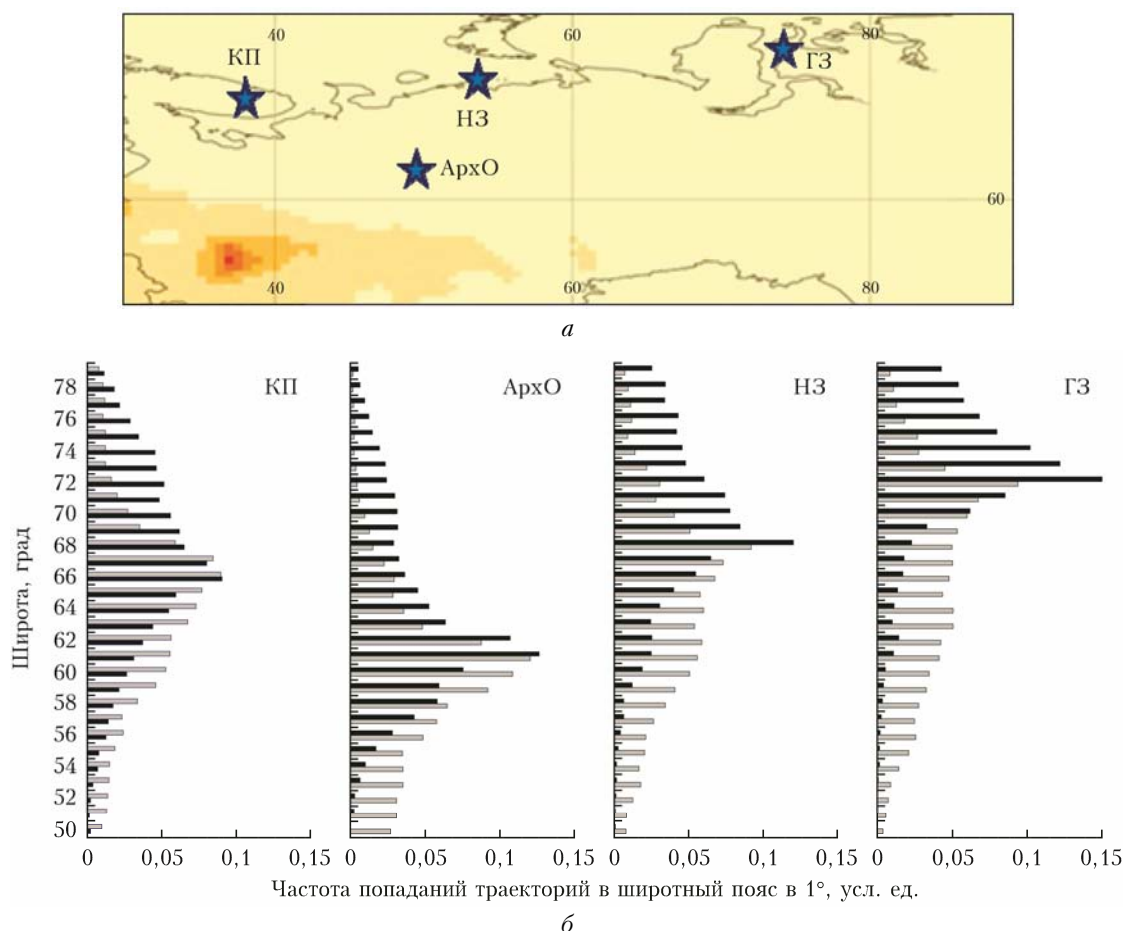


Рис. 1. Карта расположения пунктов модельных расчетов (а). Диаграммы средних за 2000–2009 гг. (в пределах 0–180° в.д.) широтных распределений траекторий движения воздушных масс к пунктам в январе (серый цвет) и июле (черный цвет) (б)

при анализе дальнего переноса воздушных масс к рассматриваемым пунктам удалось грубо оценить среднее в течение года смещение траекторий переноса воздушных масс в широтном направлении (рис. 1). Для пунктов КП и НЗ, расположенных примерно на одной широте, внутригодовое смещение траекторий составляет 5–7° с.ш., т.е. 550–800 км. Для пункта АрхО, расположенного на 5° южнее, смещение траекторий в течение года несколько меньше (около 400–450 км), а для более северного пункта ГЗ, наоборот, больше – до 1000 км.

Концентрация ВС рассчитывается методом статистики обратных траекторий движения воздушных масс. Предполагается, что ВС в атмосфере переносится как пассивная примесь на субмикронных аэрозольных частицах. В общем случае концентрация примеси (переносимой на субмикронных аэрозольных частицах) в приземном воздухе рассматриваемого пункта вычисляется по формуле

$$C_{ij} = Q_{ij} \times Z_{ij}, \quad (1)$$

где Z_{ij} – функция чувствительности к потенциальным источникам примеси в ячейке сетки с географическими координатами (ij), рассчитанная для этого пункта; Q_{ij} – выброс примеси на поверхность земли в ячейке с координатами (ij). При анализе используется разработанная авторами программа расчета эффективности дальнего переноса субмикронной примеси в удаленные районы [26]. Величина и пространственное распределение функции Z_{ij} вычисляется по массиву обратных траекторий и определяется не только количеством траекторий, прошедших через ячейку, но и процессами осаждения примеси на поверхность по мере переноса. Скорость осаждения, в свою очередь, зависит от качества поверхности (разного в разные сезоны) от характеристик атмосферы по пути переноса (высота слоя перемешивания, осадки и др.), а также длины пути и длительности переноса [27]. Суммируя вклады от всех ячеек, рассчитанные для каждого конкретного пункта по формуле (1), получаем среднюю концентрацию примеси в воздухе этого пункта за тот период времени, для которого строились обратные траектории. Поскольку многие параметры должны меняться от сезона к сезону, обычно рассматривается месяц или сезон одного года. Используемые нами значения скорости осаждения ВС на разных территориях и в разные сезоны представлены в [27].

Проблемы параметризации показателей, необходимых для расчетов, обсуждались во многих публикациях (например, [3, 11, 13, 14, 27]). К сожалению, все предположения о скорости осаждения, химической пассивности и других свойствах ВС крайне ненадежны, а экспериментальных данных почти нет. В первую очередь все параметры должны заметно различаться в разные сезоны (разное качество подстилающей поверхности, осадков, разная температура воздуха и т.д.). Обычно скорость осаждения такой примеси на поверхность зимой на порядок и более ниже, чем летом. Поэтому концентрация антропогенного ВС в воздухе в удаленном

от источников районе выше зимой, чем летом (как отмечалось, поле антропогенных эмиссий источников мало меняется в течение года). Этому же способствует и смещение арктического фронта, поскольку летом уменьшается количество источников ВС, от которых примесь может быть перенесена в удаленные районы Арктики.

Распределение и мощность антропогенных источников ВС [28] и лесных пожаров [29] получены по спутниковым данным на сетке географических координат 0,25° × 0,25°. В табл. 1 приведены оценки суммарной антропогенной эмиссии ВС с разных территорий севера Евразии и границы этих территорий (условное разбиение, принятое в данной работе). Антропогенные эмиссии ВС в холодное и теплое время года различаются мало: в целом менее чем на 0,5%, максимально для Западной Европы – на 2,5%.

Таблица 1

Средняя эмиссия ВС с некоторых территорий Севера Евразии в атмосферу

Территория	Географические границы, ° с.ш. × ° в.д.	Антропогенная эмиссия ВС, т/мес.
Север Евразии	(52–74) × (0–180)	24600
Россия	(52–74) × (30–180)	15870
ЕТР	(52–74) × (30–60)	7100
Западная Сибирь	(52–74) × (60–90)	7570
Западная Европа	(52–74) × (0–30)	8730
Зона факелов	(60–68) × (54–80)	5790
АТР	(52–74) × (60–180)	8780

Примечание. Зона факелов – территория, условно ограниченная указанными координатами, на которой плотно располагается большая часть источников ВС, связанных с производственными процессами добычи жидкого и газообразного углеводородсодержащего топлива в крупнейших в России Западно-Сибирской и Тимано-Печорской нефтегазовых провинциях; ЕТР и АТР – европейская и азиатская территории России.

Ниже на картах и в таблицах результаты представлены для пространства (52–74)° с.ш. × (30–90)° в.д., т.е. для ЕТР и Западной Сибири, через которые преимущественно проходят воздушные массы к рассматриваемым четырем пунктам и зимой, и летом. Как показали наши оценки, вклад Западной Европы в загрязнение российской территории черным углеродом заметен лишь в пунктах КП и АрхО, но и здесь он в целом пренебрежимо мал, составляя в отдельные годы лишь 1–3% от атмосферной концентрации ВС. Территории севернее 74° с.ш. можно не учитывать, поскольку там практически нет источников ВС.

Антропогенные эмиссии ВС для оценок можно считать постоянными как по величине, так и по их положению не только в течение года, но и от года к году в пределах рассматриваемых 17 лет. Величина и положение эмиссий ВС от пожаров, наоборот, сильно меняются во времени и пространстве (рис. 2, 3 (цв. вкладка)).

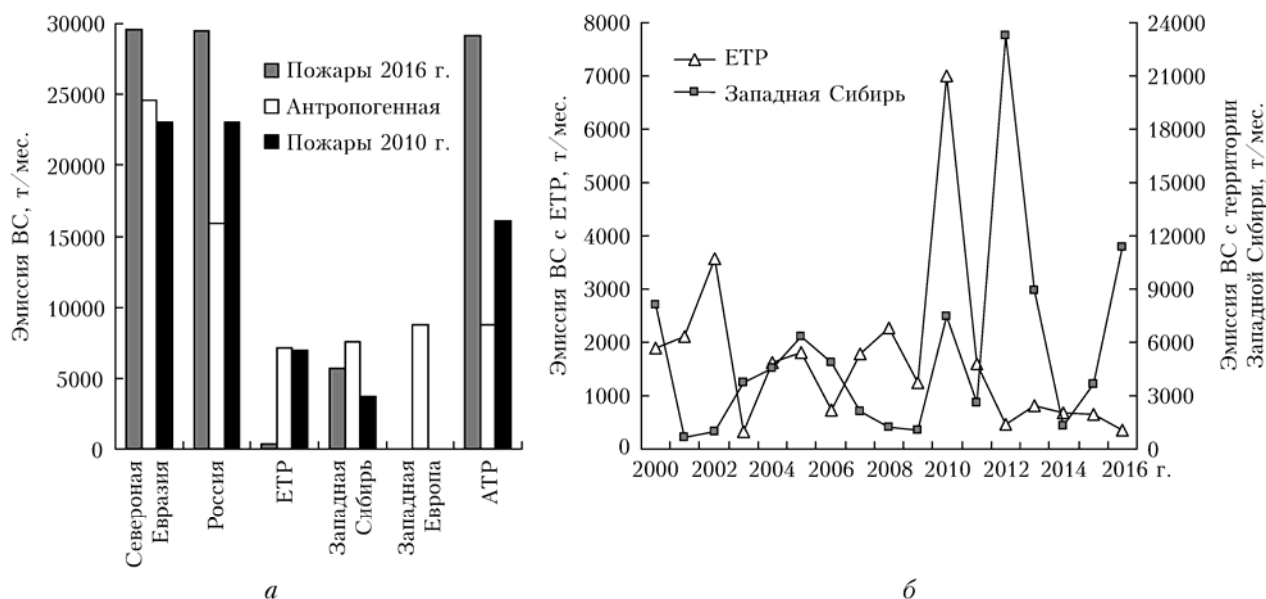


Рис. 2. Эмиссия ВС в атмосферу летом от разных источников (см. табл. 1): *а* — средняя антропогенная за все годы и от пожаров в 2010 и 2016 гг.; *б* — от пожаров (межгодовые вариации) на ЕТР и в Западной Сибири

Из рис. 2, *а* видно, что суммарные пожарные эмиссии ВС со всей территории севера Евразии в отдельные годы превосходят антропогенные. Рис. 2, *б* показывает, что десятилетие с 2000 по 2009 г. можно рассматривать как сравнительно однородный период с точки зрения изменения мощности пожарных эмиссий ВС от года к году (рис. 3, *а*). Затем, с 2010 по 2016 г. на разных территориях России возникали аномально сильные пожары и выбросы ВС в атмосферу.

Рассмотрим более подробно летние сезоны 2010, 2012 и 2016 гг., которые различаются не только по расположению и интенсивности пожаров (рис. 2, *б* и рис. 3, *б–з*), но и по условиям переноса воздушных масс и атмосферных примесей (рис. 3, *е–з*). Лето 2012 г. характеризовалось очень мощными пожарами в Западной Сибири (рис. 3, *в*), но при нормальных условиях воздушного переноса над центром России с запада на восток продукты горения не попали на ЕТР (рис. 3, *ж*), и, как показано далее, даже в пункте ГЗ пожары 2012 г. слабо сказались на концентрации ВС в атмосфере. В 2010 и 2016 гг. летом отмечались аномальные циркуляция атмосферы над ЕТР и центром России с разными условиями блокирования типичных путей переноса воздушных масс. Антициклон в июле — августе 2010 г. почти месяц стоял над центром ЕТР, здесь же были аномально сильные для ЕТР пожары (рис. 3, *б*). Антициклон способствовал перемешиванию воздуха и накоплению антропогенных загрязнений и продуктов горения биомассы (рис. 3, *е*), в том числе и ВС над этой обширной территорией [30, 31]. В июле 2016 г. во время мощных пожаров на юге Западной Сибири (рис. 3, *з*) в приземной атмосфере наблюдался уникальный перенос воздушных масс с востока на запад (рис. 3, *з*). При этом ВС и другие продукты горения биомассы

из Западной Сибири достигли ряда районов ЕТР, в том числе арктических, и некоторых стран Западной Европы [32].

Результаты и обсуждение

Некоторые статистические показатели загрязнения черным углеродом приземного воздуха рассматриваемых северных районов России приведены в табл. 2. Видно, что наибольшие значения концентрации ВС в приземном воздухе как зимой, так и летом формируются в районе НЗ. Далее по убыванию загрязнения атмосферы черным углеродом следуют районы АрхО, КП, ГЗ. При использовании данных табл. 2 для оценки общей антропогенной нагрузки на экосистемы рассматриваемых районов необходимо учитывать средние значения концентрации ВС, а при сравнении с данными конкретных измерений — медиану как наиболее вероятное значение концентрации.

Зимой во всех рассмотренных районах разброс концентрации ВС и доли факелов от года к году не слишком велик (рис. 4), что подтверждают также сравнительно небольшие отличия (на 10–15%) среднего значения от медианы (см. табл. 2). Наоборот, летом в воздухе каждого пункта среднее значение и медиана этих показателей различаются очень сильно, что свидетельствует о сильных межгодовых колебаниях как концентрации ВС в приземном воздухе (рис. 5), так и вкладов в нее факельных и пожарных эмиссий. Для каждого пункта средняя летняя концентрация ВС меньше зимней (см. табл. 2), что, как отмечалось выше, связано с сезонными различиями циркуляционных процессов (рис. 1) и времени жизни ВС в атмосфере над севером Евразии.

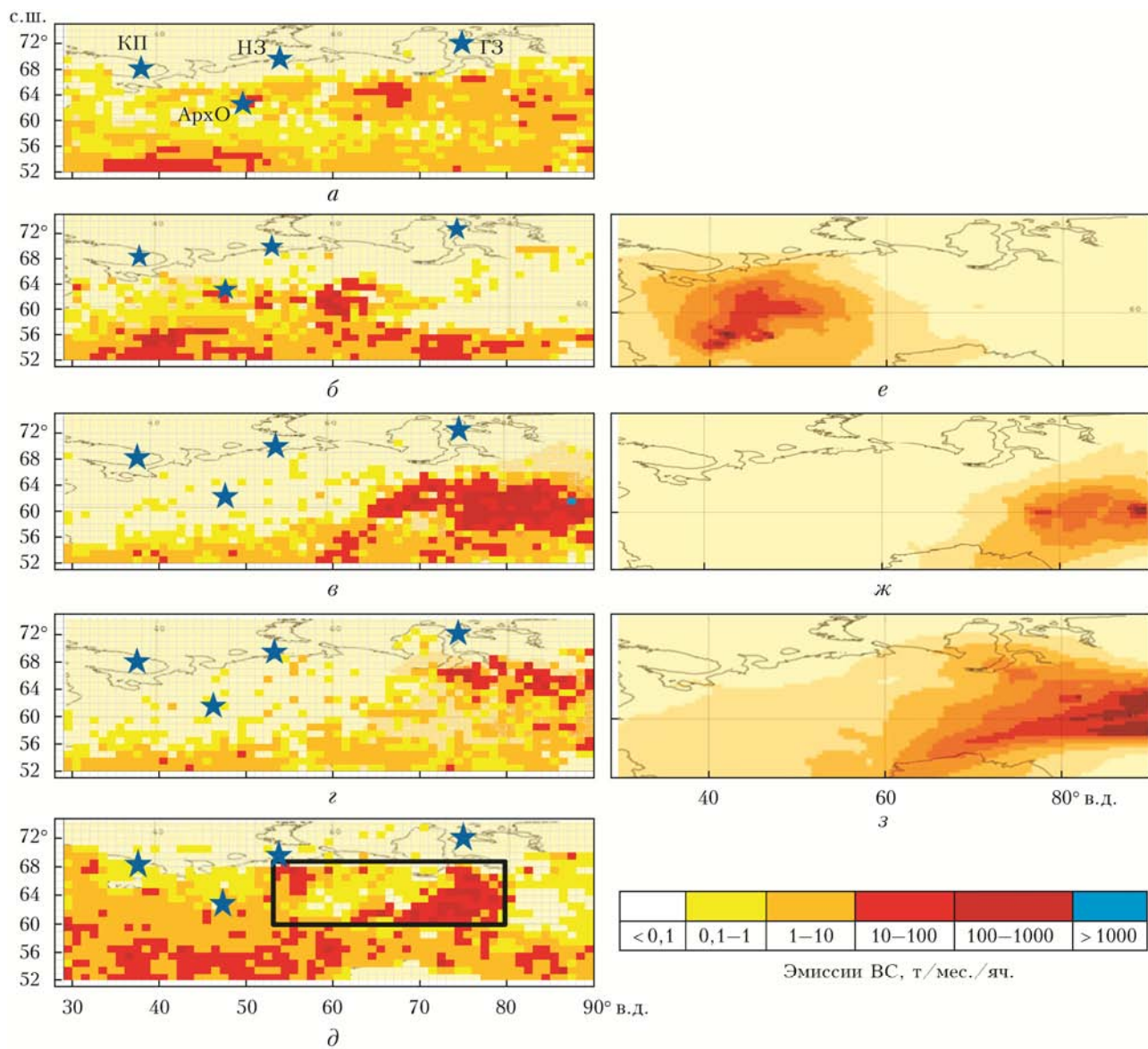


Рис. 3. Пространственное распределение эмиссий ВС по ЕТР и Западной Сибири в июле: от пожаров за 2000–2016 гг. без 2010, 2012 и 2016 гг. (а); от пожаров в 2010 (б), 2012 (в) и 2016 гг. (г); средние антропогенные эмиссии (д), черная рамка – примерная зона факелов (см. табл. 1); среднее за июль пространственное распределение ВС в столбе атмосферы по данным реанализа MERRA-2: в 2010 (е), 2012 (ж), 2016 гг. (з); шкала эмиссии ВС – логарифмическая; звездочки – рассматриваемые пункты

Таблица 2

Статистические показатели загрязнения атмосферы черным углеродом в разных районах Российской Арктики зимой и летом в 2000–2016 гг. Доли вкладов факелов и пожаров в среднюю концентрацию ВС

Район	Месяц	Концентрация ВС, мкг/м ³			Доля факелов, %		Доля пожаров, %	
		средняя	медиана	максимальная среднемесячная (год)	средняя	медиана	средняя	медиана
КП	Январь	0,84	0,80	1,22 (2010)	3,4	3,0	—	—
	Июль	0,16	0,12	0,64 (2016)	0,7	0,03	5,4	1,8
АрхО	Январь	2,34	1,98	4,47 (2013)	1,3	1,0	—	—
	Июль	0,33	0,17	2,51 (2016)	1,2	0,4	14,6	3,8
НЗ	Январь	5,80	5,10	15,9 (2000)	95,0	96,0	—	—
	Июль	4,31	3,65	12,0 (2004)	94,6	97,0	1,7	0,3
ГЗ	Январь	0,30	0,33	0,53 (2007)	71,0	76,0	—	—
	Июль	0,11	0,02	0,028 (2006)	0,9	0,8	13,3	5,7

Полученные модельные значения соответствуют диапазонам измеренных концентраций ВС над морями Российской Арктики [6–9, 34], на о. Белый (вблизи северной оконечности п-ова Ямал) [2], а также на побережье Белого моря [5] и на ГМС Тикси [35].

Зимой *вблизи пунктов КП и АрхО* практически весь ВС в приземном воздухе выбрасывается антропогенными источниками, не связанными с факелами нефте- и газодобычи (рис. 4, а, б и 5, а, б). Вклад факелов в концентрацию ВС в приземной атмосфере пунктов КП и АрхО ничтожен как зимой, так и летом, лишь в июле 2016 г. он достигал 7–8% (рис. 5, а, б) при аномальном переносе воздушных масс с востока на запад [32], как отмечалось выше. Летом в этих районах вклад пожаров заметен только в отдельные годы — до 35% на Кольском п-ове в 2011 г. (рис. 5, а) и до 70%

в Архангельской обл. в 2010 и 2011 гг. (рис. 5, б). Летом 2010 г., когда над ЕТР стоял антициклон, блокирующий воздушные массы и загрязнения над этой территорией [30, 31] (см. комментарии к рис. 3), наоборот, пункт КП был вне его действия, и вклад пожаров в атмосферную концентрацию ВС здесь был минимальным (рис. 5, а) за рассматриваемые 17 лет.

В *районе НЗ* практически весь ВС в приземном воздухе круглый год имеет антропогенное происхождение (рис. 4, в, 5, в) из близко расположенной (см. рис. 3, з) зоны факелов: 80–97% зимой и 90–97% летом.

В *районе ГЗ* зимой (рис. 4, з) зона факелов также вносит значительный вклад в концентрацию ВС в приземной атмосфере (30–85% в разные годы). Летом (рис. 5, з) этот вклад составляет в разные годы от 0 до 15% и лишь в 2015 г. при специфической

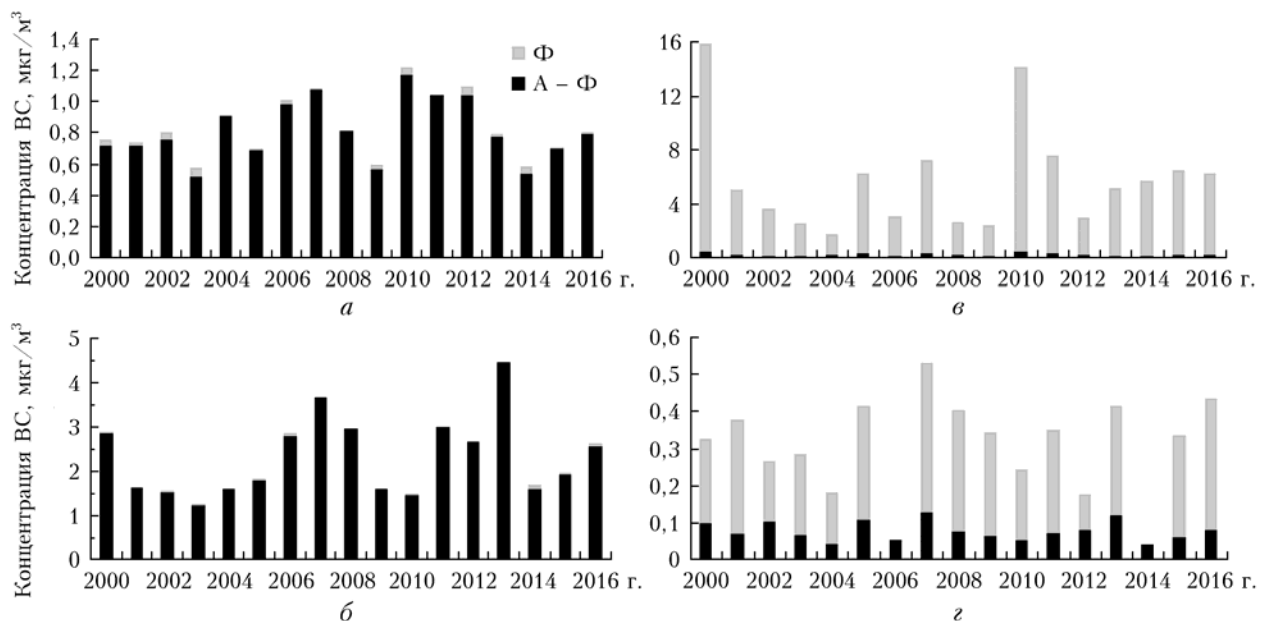


Рис. 4. Концентрация ВС и вклад в нее факельных (Ф) и антропогенных эмиссий без факелов (А – Ф) в приземной атмосфере рассматриваемых пунктов в январе: а – КП; б – АрхО; в – НЗ; з – ГЗ

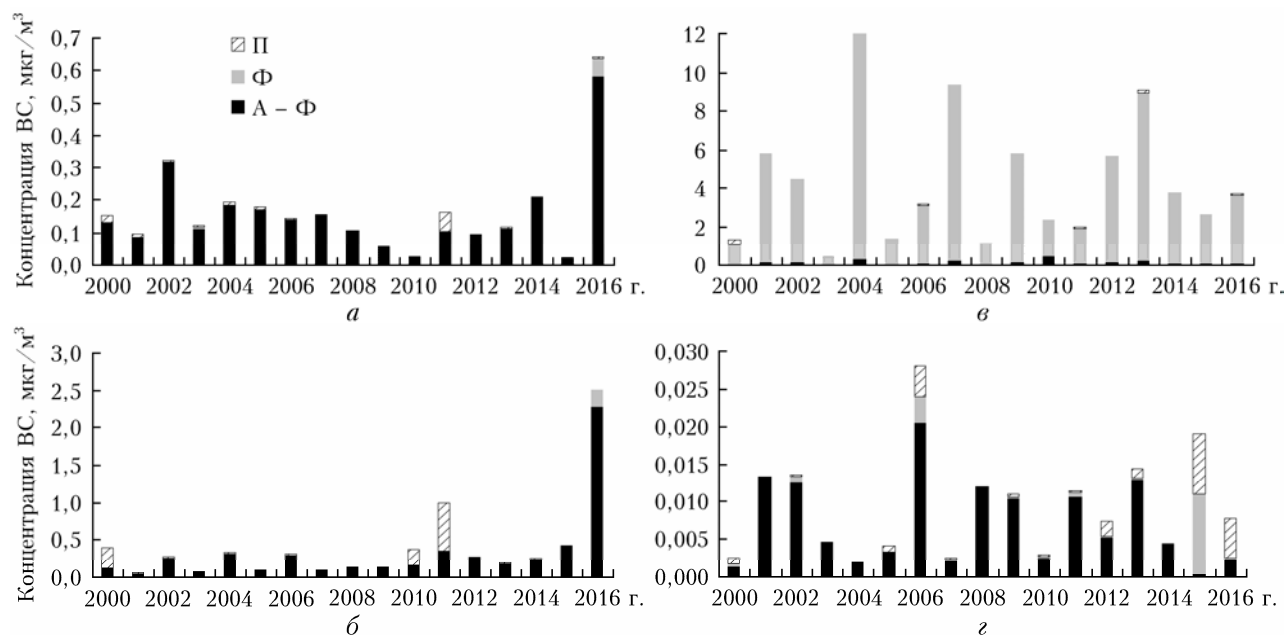


Рис. 5. Концентрация ВС и ее составляющие от пожаров (П), факелов (Ф), антропогенных источников без факелов (А – Ф) в приземной атмосфере рассматриваемых пунктов в июле: а – КП; б – АрхО; в – НЗ; г – ГЗ

циркуляции атмосферы он превысил 55%. Вклад пожаров в концентрацию ВС в воздухе пункта ГЗ тоже очень изменчив от года к году: от 0 в некоторые годы до 65% в 2016 г., когда было сильным влияние пожаров из Западной Сибири (см. рис. 3, е). Заметим, что доля пожаров в концентрации ВС примерно одинакова в пунктах АрхО и ГЗ, но абсолютная концентрация ВС в пункте ГЗ в три раза ниже, а медиана – ниже почти на порядок (см. табл. 2), чем в АрхО.

Отметим, что в центральной части арктического побережья России (в лесотундре Западной Сибири и тундре Таймыра) были зарегистрированы изменения характеристик экосистем (вегетационного индекса NDVI, температуры воздуха и поверхности), характерные для потепления регионального климата [33]. Возможно, это связано с постоянно высоким содержанием ВС в воздухе и его осаждением из атмосферы на подстилающую поверхность в этих районах, расположенных достаточно близко к пункту НЗ, примерно на той же широте.

Заключение

Выполнены модельные оценки концентрации черного углерода в приземной атмосфере четырех пунктов Российской Арктики, расположенных на Колском п-ове, в Архангельской обл., на территориях Ненецкого и Гыданского заповедников зимой и летом 2000–2016 гг. В целом вклады антропогенных источников в содержание ВС в воздухе всех рассматриваемых районов преобладают над вкладами природных пожаров. Отдельно рассмотрены годы аномально сильных пожаров на ЕТР и в Западной Сибири, а также годы аномального переноса воздушных масс и загрязнений, связанного с мощными атмосферными блокировками.

Для каждого из четырех пунктов приведены средние, максимальные значения и медианы концентрации ВС в приземном воздухе зимой и летом, рассчитанные по межгодовым вариациям (за 17 лет) среднемесячных величин. Эти изменения от года к году обусловлены, с одной стороны, различиями в циркуляции атмосферы, а с другой – пространственными и межгодовыми вариациями эмиссий ВС от пожаров. Средние значения общей антропогенной нагрузки по ВС на экосистемы рассматриваемых районов за длительное время удобно оценивать по среднемесячным величинам, тогда как сравнение с данными конкретных измерений более корректно проводить по медианам как наиболее вероятным значениям концентрации ВС в приземном воздухе с учетом максимальных оценок.

Концентрация ВС в приземном воздухе максимальна в районе Ненецкого заповедника и над акваторией Печорского моря, где основным источником этой примеси круглый год являются факелы сжигания попутного газа на территориях ближайших крупнейших нефтегазовых провинций России. Именно в этом районе российского побережья Северного Ледовитого океана географы и экологи уже отмечают по ряду показателей состояния окружающей среды (температура воздуха, положение изотермы +10°, температура поверхности, индекс NDVI растительности) статистически достоверные сдвиги, указывающие на потепление регионального климата.

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (грант № 22-77-10074).

Список литературы

1. Petäjä T. et al. Overview: Integrative and Comprehensive Understanding on Polar Environments (iCUPE) –

- concept and initial results // *Atmos. Chem. Phys.* 2020. P. 8551–8592. DOI: 10.5194/acp-20-8551-2020.
2. Поповичева О.Б., Чичаева М.А., Кобелев В.О., Касимов Н.С. Региональные источники загрязнения атмосферы Арктики черным углеродом по данным измерений на острове Белый // *Оптика атмосфер. океана*. 2022. Т. 35, № 12. С. 1043–1050. DOI: 10.15372/AOO20221212.
3. Cheng M.-D. Geolocating Russian sources for Arctic black carbon // *Atmos. Environ.* 2014. V. 92, N 4. P. 398–410. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2014.04.031.
4. AMAP Assessment 2015: Black Carbon and Ozone as Arctic Climate Forcers. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP). Oslo, Norway. vii +, 2015. 116 p.
5. 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 Кандакского залива Белого моря // *Докл. РАН*. 2015. Т. 461, № 1. С. 70–74. DOI: 10.7868/S086956521507021X.
6. Панкратова Н.В., Беликов И.Б., Белоусов В.А., Копейкин В.М., Скороход А.И., Штабкин Ю.А., Малафеев Г.В., Флинт М.В. Концентрация метана, озона, черного углерода, оксидов азота, углерода и содержание $\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4}$ над морями Российской Арктики (судовые наблюдения) // *Океанология*. 2020. Т. 60, № 5. С. 685–695. DOI: 10.31857/S0030157420050202.
7. Сакерин С.М., Круглинский И.А., Кабанов Д.М., Калашникова Д.А., Кравчишина М.Д., Макаров В.И., Попова С.А., Почуфаров А.О., Симонова Г.В., Турчинович Ю.С., Дарин Ф.А. Пространственно-временная изменчивость характеристик атмосферного аэрозоля над Карским, Баренцевым, Норвежским и Гренландским морями (экспедиции 2018–2021 гг.) // *Оптика атмосфер. и океана*. 2022. Т. 35, № 6. С. 447–455; Sakerin S.M., Kruglinsky I.A., Kabanov D.M., Kalashnikova D.A., Kravchishina M.D., Makarov V.I., Popova S.A., Pochufarov A.O., Simonova G.V., Turchinovich Yu.S., Darin F.A. Spatiotemporal variations in atmospheric aerosol characteristics over the Kara, Barents, Norwegian, and Greenland Seas (2018–2021 expeditions) // *Atmos. Ocean. Opt.* 2022. V. 35, N 6. P. 651–660.
8. Голобокова Л.П., Ходжер Т.В., Изосимова О.Н., Зенкова П.Н., Почуфаров А.О., Хуриганова О.И., Онищук Н.А., Маринайте И.И., Полькин В.В., Радионов В.Ф., Сакерин С.М., Лисицын А.П., Шевченко В.П. Химический состав атмосферного аэрозоля в арктическом районе по маршрутам морских экспедиций 2018–2019 гг. // *Оптика атмосфер. и океана*. 2020. Т. 33, № 6. С. 421–429; Golobokova L.P., Khodzher T.V., Izosimova O.N., Zenkova P.N., Pochufarov A.O., Khuriganova O.I., Onishyuk N.A., Marinayte I.I., Polkin V.V., Radionov V.F., Sakerin S.M., Lisitzin A.P., Shevchenko V.P. Chemical composition of atmospheric aerosol in the arctic region and adjoining seas along the routes of marine expeditions in 2018–2019 // *Atmos. Ocean. Opt.* 2020. V. 33, N 5. P. 480–489.
9. Радионов В.Ф., Кабанов Д.М., Полькин В.В., Сакерин С.М., Изосимова О.Н. Характеристики аэрозоля над арктическими морями Евразии: результаты измерений 2018 года и среднее пространственное распределение в летне-осенние периоды 2007–2018 годов // *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2019. Т. 65, № 4. С. 405–421. DOI: 10.30758/0555-2648-2019-65-4-405-421.
10. Zhu C., Kanaya Y., Takigawa M., Ikeda K., Tanimoto H., Taketani F., Miyakawa T., Kobayashi H., Pissot I. FLEXPART v10.1 simulation of source contributions to Arctic black carbon // *Atmos. Chem. Phys.* 2020. P. 1641–1656. DOI: 10.5194/acp-20-1641-2020.
11. Bond T.C., Doherty S.J., Fahey D.W., Forster P.M., Berntsen T., De Angelo 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., Storelvmo T., Warren S.G., Zender C.S. Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment // *J. Geophys. Res.: Atmos.* V. 118, N. 11. P. 5380–5552. DOI: 10.1002/jgrd.50171.
12. 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. DOI: 10.5194/acp-13-8833-2013.
13. Evangeliou N., Balkanski Y., Hao W.M., Petkov A., Silverstein R.P., Corley R., Nordgren B.L., Urbanski S.P., Eckhardt S., Stohl A., Tunved P., Crepinsek S., Jefferson A., Sharma S., Nøjgaard J.K., Skov H. Wildfires in northern Eurasia affect the budget of black carbon in the Arctic – a 12-year retrospective synopsis (2002–2013) // *Atmos. Chem. Phys.* 2016. V. 16, N. 12. P. 7587–7604. DOI: 10.5194/acp-16-7587-2016.
14. Nagovitsyna E.S., Poddubny V.A., Karasev A.A., Kabanov D.M., Sidorova O.R., Maslovsky A.S. Assessment of the spatial structure of black carbon concentrations in the near-surface Arctic atmosphere // *Atmosphere*. 2023. V. 14. P. 139–150. DOI: 10.3390/atmos14010139.
15. Виноградова А.А., Пономарева Т.Я. Атмосферный перенос антропогенных примесей в арктические районы России (1986–2010 гг.) // *Оптика атмосфер. и океана*. 2012. Т. 25, № 6. С. 475–483; Vinogradova A.A., Ponomareva T.Ya. Atmospheric transport of anthropogenic impurities to the Russian Arctic (1986–2010) // *Atmos. Ocean. Opt.* 2012. V. 25, N 6. P. 414–422.
16. Виноградова А.А., Веремейчик А.О. Модельные оценки содержания антропогенной сажи (black carbon) в атмосфере Российской Арктики // *Оптика атмосфер. и океана*. 2013. Т. 26, № 6. С. 443–451.
17. Виноградова А.А., Смирнов Н.С., Коротков В.Н. Аномальные пожары 2010 и 2012 гг. на территории России и поступление черного углерода в Арктику // *Оптика атмосфер. и океана*. 2016. Т. 29, № 6. С. 482–487; Vinogradova A.A., Smirnov N.S., Korotkov V.N. Anomalous wildfires in 2010 and 2012 on the territory of Russia and supply of Black Carbon to the Arctic // *Atmos. Ocean. Opt.* 2016. V. 29, N 5. P. 545–550.
18. Виноградова А.А., Васильева А.В. Модельные оценки концентрации черного углерода в приземном воздухе северных районов России // *Оптика атмосфер. и океана*. 2017. Т. 30, № 6. С. 467–475; Vinogradova A.A. and Vasileva A.V. Black Carbon in air over northern regions of Russia: Sources and spatiotemporal variations // *Atmos. Ocean. Opt.* 2017. V. 30, N 6. P. 533–541.
19. Виноградова А.А., Иванова Ю.А. Перенос воздушных масс и загрязнений к арктическим островам России (1986–2016): долговременные, межгодовые и сезонные вариации // *Геофизические процессы и биосфера*. 2017. Т. 16, № 4. С. 5–20.
20. Виноградова А.А., Васильева А.В., Иванова Ю.А. Загрязнение воздуха черным углеродом в районе острова Врангеля: сравнение источников и вкладов территорий Евразии и Америки // *Оптика атмосфер. и океана*. 2020.

- T. 33, № 12. С. 907–912; *Vinogradova A.A., Vasileva A.V., Ivanova Yu.A.* Air pollution by Black Carbon in the region of Wrangel Island: Comparison of Eurasian and American sources and their contributions // *Atmos. Ocean. Opt.* 2021. V. 34, N 2. P. 97–103.
21. *ARL NOAA*. Air Resources Laboratory: modified January 21, 2021. URL: <http://www.arl.noaa.gov/ready/> (last access: 3.03.2023).
 22. *Stein A., Draxler R., Rolph G., Stunder B., Cohen M., Ngan F.* NOAA's HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system // *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 2015. V. 96. P. 2059–2077. DOI: 10.1175/BAMS-D-14-00110.1.
 23. *Barrie L.A.* Arctic aerosols: Composition, sources and transport // *NATO ASI Series*. 1995. V. 130. P. 1–22. DOI: 10.1007/978-3-642-51172-1_1.
 24. *Черенкова Е.А., Туткова Т.Б., Михайлов А.Ю.* Сезонные особенности Арктического фронта на территории России в XX и XXI веках // *Криосфера Земли*. 2014. Т. 18, № 4. С. 78–85.
 25. *Туткова Т.Б., Виноградова В.В., Михайлов А.Ю.* Климатические вариации Арктического фронта в теплый период года и их проявления в ландшафтах Севера // *Изв. РАН. Сер. геогр.* 2015. № 4. С. 39–46. DOI: 10.15356/0373-2444-2015-4-39-46.
 26. *Виноградова А.А. Карпов А.В.* Программа для ЭВМ. Рег. № 2019662239. Дата регистрации: 19.09.2019.
 27. *Виноградова А.А.* Дистанционная оценка влияния загрязнения атмосферы на удаленные территории // *Геофизические процессы и биосфера*. 2014. Т. 13, № 4. С. 5–20.
 28. *EDGAR*. Emissions Database for Global Atmospheric Research. URL: <http://edgar.jrc.ec.europa.eu/overview.php?v=431> (last access: 3.03.2023).
 29. *GFED*. Global Fire Emissions Database. URL: <http://www.globalfiredata.org> (last access: 3.03.2023).
 30. *Gorchakov G.I., Sitnov S.A., Sviridenkov M.A., Semoutnikova E.G., Emilenko A.S., Isakov A.A., Kopeikin V.M., Karpov A.V., Gorchakova I.A., Verichev K.S., Kurbatov G.A., Ponomareva T.Ya.* Satellite and ground-based monitoring of smoke in the atmosphere during the summer wildfires in European Russia in 2010 and Siberia in 2012 // *Int. J. Remote Sens.* 2014. V. 35, N 15. P. 5698–5721.
 31. *Ситнов С.А., Горчаков Г.И., Свириденков М.А., Копейкин В.М., Пономарева Т.Я., Карпов А.В.* Влияние атмосферной циркуляции на эволюцию и радиационный форсинг дымового аэрозоля на европейской части России летом 2010 г. // *Исследование Земли из космоса*. 2013. № 2. С. 28–41. DOI: 10.7868/S0205961413010065.
 32. *Семутникова Е.Г., Горчаков Г.И., Ситнов С.А., Копейкин В.М., Карпов А.В., Горчакова И.А., Пономарева Т.Я., Исаков А.А., Гуцин Р.А., Даценко О.И., Курбатов Г.А., Кузнецов Г.А.* Сибирская дымная мгла над европейской территорией России в июле 2016 г. Загрязнение атмосферы и радиационные эффекты // *Оптика атмосф. и океана*. 2017. Т. 30, № 11. С. 962–970; *Semoutnikova E.G., Gorchakov G.I., Sitnov S.A., Kopeikin V.M., Karpov A.V., Gorchakova I.A., Ponomareva T.Ya., Isakov A.A., Gushchin R.A., Datsenko O.I., Kurbatov G.A., Kuznetsov G.A.* Siberian smoke haze over European territory of Russia in July 2016: Atmospheric pollution and radiative effects // *Atmos. Ocean. Opt.* 2018. V. 31, N 2. P. 171–180.
 33. *Туткова Т.Б., Золотокрылин А.Н.* Региональная неравномерность летнего потепления материковой Арктики как индикатор природных границ северных ландшафтов // *Арктика: экология и экономика*. 2021. Т. 11, № 3. С. 386–396. DOI: 10.25283/2223-4594-2021-3-386-396.
 34. *Sakerin S.M., Kabanov D.M., Kopeikin V.M., Kruglinsky I.A., Novigatsky A.N., Pol'kin V.V., Shevchenko V.P., Turchinovich Yu.S.* Spatial distribution of black carbon concentrations in the atmosphere of the North Atlantic and the European sector of the Arctic Ocean // *Atmosphere*. 2021. V. 12. P. 949–965. DOI: 10.3390/atmos12080949.
 35. *Popovicheva O., Diapouli E., Makshas A., Shonija N., Manousakas M., Saraga D., Uttal T., Eleftheriadis K.* East Siberian Arctic background and black carbon polluted aerosols at HMO Tiksi // *Sci. Tot. Environ.* 2019. V. 655, N 3. P. 924–938. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.11.165.

A.A. Vinogradova, Yu.A. Ivanova. Atmospheric transport of black carbon to the Russian Arctic from different sources: winter and summer 2000–2016.

Model estimates of the concentrations of black carbon (BC) in the surface air at four sites located on Kola Peninsula, in Arkhangelsk region, and on the territories of Nenets and Gydansky nature reserves were carried out for winter and summer 2000–2016 based on satellite data. The long-range atmospheric BC transport is analyzed by the author's methodology for calculating the function of sensitivity to potential sources of submicron aerosol for the sites under study based on the statistics of back trajectories of air mass transport. The contribution of anthropogenic sources to BC concentration in every region generally prevails over the contribution of natural fires. The BC concentration in surface air is maximal over the Nenets Nature Reserve and, hence, over the Pechora Sea, where the main sources of this impurity all year round are gas flares at the Russian largest oil and gas provinces. The average, median, and maximal values of BC concentrations in the surface air in winter and summer are calculated from its interannual variations due to differences in air mass circulation, as well as from spatial and interannual variations in BC emissions from wildfires.