

Черный углерод в воздухе северных районов России: источники, пространственные и временные вариации

А.А. Виноградова, А.В. Васильева*

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

Поступила в редакцию 23.01.2017 г.

Выполнены модельные оценки концентраций черного углерода (black carbon – BC) в воздухе разных районов Российского севера в 2000–2013 гг. Обсуждаются различные физические источники BC в атмосфере (антропогенные и природные пожары), эмиссии этих источников на территории России (по разным данным), оцениваются их вклады в концентрацию BC в воздухе арктических районов России зимой и летом. Используются спутниковые данные об эмиссиях BC в атмосферу (GFED, MACCity и др.), а также авторские оценки на основе данных официальной статистики РФ. Дальний перенос BC в атмосфере анализируется методом статистики обратных траекторий движения воздушных масс, развитом ранее на базе данных ARL NOAA (HYSPLIT Model).

В приземном воздухе северных районов РФ вклады антропогенных источников BC преобладают над вкладами от природных пожаров даже летом (кроме района Усть-Ленского заповедника), когда вклады удаленных антропогенных источников минимальны. Вдоль побережья Северного Ледовитого океана средние концентрации BC в воздухе отличаются на два порядка с максимумом в районе Ненецкого заповедника (основной источник – близко расположенные факелы сжигания попутного газа в местах активной добычи углеводородного сырья). Межгодовые и межсезонные различия концентраций BC в воздухе велики, поэтому оценки по средним многолетним показателям мало информативны. Результаты измерения содержания BC в воздухе одного пункта в течение одного сезона или даже одного года не должны быть основой для долгосрочных выводов и прогнозов в отношении всего региона.

Ключевые слова: черный углерод, российские эмиссии черного углерода, спутниковая информация, данные российской статистики, дальний перенос в атмосфере, Арктика; black carbon, Russian BC emissions, satellite data, data of Russian statistics, long-range atmospheric transport, the Arctic.

Введение

В последние годы роль черного углерода (black carbon – BC) как климатообразующей компоненты атмосферы изучается все более подробно – для разных территорий, с помощью разных подходов и баз данных, путем модельных расчетов и реальных наблюдений [1–6]. Климат Арктического региона в значительной степени является определяющим для всего Северного полушария [7, 8], и именно в Арктике климатические эффекты BC проявляются наиболее ярко. Однако многообразие физических механизмов эмиссии BC в атмосферу, а также атмосферных процессов, определяющих его распространение и влияние на радиационный баланс, делает этот феномен чрезвычайно сложным для понимания, математического описания и оценок. Поэтому мотивация исследований эмиссий черного углерода, его дальнего переноса в атмосфере, оценок его содержания в воздухе удаленных арктических районов очевидна.

Черный углерод попадает в атмосферу в результате неполного сгорания различных углеродсодержащих топлив; его физические источники весьма многообразны – от выбросов различных двигателей до природных пожаров огромных масштабов. Антропогенные эмиссии BC действуют круглый год и более или менее стационарны, тогда как эмиссии от пожаров существуют только в теплое время года и изменчивы как во времени, так и в пространстве. Методики, обеспечивающие пересчет различной информации в данные об эмиссиях BC в атмосферу, сильно различаются и дают разные погрешности; кроме того, они постоянно совершенствуются [1, 2]. Таким образом, сравнение разных данных и результатов, по ним рассчитанных, – актуальная, но весьма сложная задача.

Данная работа продолжает серию публикаций [9–12], посвященных изучению эмиссий BC и его дальнего переноса в атмосфере на территории России и Российской Арктики. Проводится сравнение полученных авторами пространственных распределений эмиссий BC по территории страны с имеющейся спутниковой информацией, уточнение получаемых оценок как самих эмиссий BC, так и результатов

* Анна Александровна Виноградова (anvinograd@yandex.ru); Анастасия Васильевна Васильева (av@ifaran.ru).

моделирования их переноса в удаленные районы Арктики.

Эмиссии черного углерода с территории России

Источники данных об эмиссиях ВС в атмосфере, используемые в работе:

(i) спутниковая информация — сайт GFED (<http://www.globalfiredata.org>) и его производные для антропогенных источников MACCity (http://eccad.sedoo.fr/eccad_extract_interface/JSF/page_login.jsf) и BCRUS (<http://acs.engr.utk.edu/Data.php>), где представлены данные об эмиссиях ВС от бытовых и промышленных предприятий и устройств, объектов энергетики, транспорта и факелов сжигания попутного газа при добыче углеводородного сырья. Эти базы данных в последние годы широко используются для аналогичных задач [1, 2];

(ii) российские статистические данные об антропогенных эмиссиях ANT [9] на базе [13] и эмиссиях от природных пожаров RLH [10, 11] на осно-

ве сведений Рослесхоза (Информационной системы дистанционного мониторинга Федерального агентства лесного хозяйства — <http://pushkino.aviales.ru>).

Исходные данные отечественной статистики сформированы для отдельных городов и целых регионов (статистика РФ по стационарным источникам, транспорту, пожарам), что дает большие ошибки в пространственных распределениях эмиссий ВС для некоторых регионов с огромными территориями. В этом смысле данные спутниковых наблюдений могут оказаться ближе к реальности.

Антропогенные эмиссии, по сравнению с эмиссиями от пожаров, характеризуются слабыми внутригодовыми вариациями (рис. 1, *a*), несмотря на возможные ожидания, например за счет изменения в течение года отопления жилых помещений и предприятий. Мы также полагаем незначительными межгодовые вариации антропогенных эмиссий, поскольку их локальные изменения от года к году не должны сильно менять ни величину общей годовой эмиссии ВС со всей территории, ни пространственное распределение этих выбросов. Некоторые данные и оценки антропогенных эмиссий ВС с разных территорий

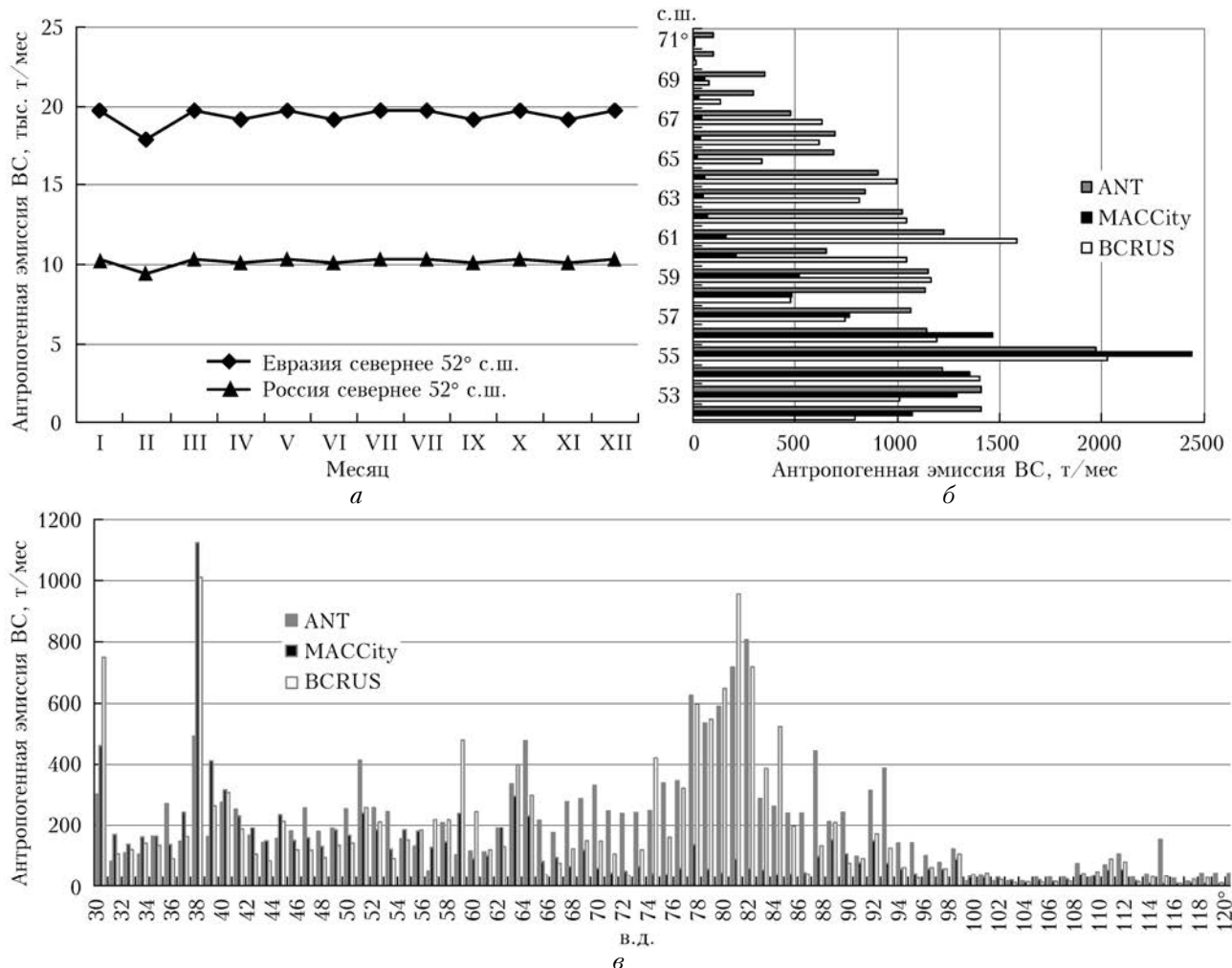


Рис. 1. Антропогенные эмиссии ВС: внутригодовые вариации по данным MACCity за 2000 г. с территории Севера Евразии и России (*a*), тыс. т/мес; на территории России — меридиональная (*б*) и зональная (*в*) проекции по разным данным в среднем за 2000 г., т/мес

Оценки антропогенных эмиссий ВС с территории севера Евразии и его частей

Территория	Границы в координатах	Антропогенные эмиссии ВС		
		MACCity 2000	ANT 2010	BCRUS 2010
Россия	52–69° с.ш., 30–161° в.д.	10,1 тыс. т/мес	17,8 тыс. т/мес	16,1 тыс. т/мес
Зона факелов*	60–68° с.ш., 54–80° в.д.	0,32 тыс. т/мес	4,77 тыс. т/мес	5,79 тыс. т/мес
Россия	52–79° с.ш., 30–180° в.д.	122 тыс. т/год	214 тыс. т/год	195 тыс. т/год
Европа (без России)	52–79° с.ш., 0–30° в.д.	111 тыс. т/год	–	–
Север Евразии	52–79° с.ш., 0–180° в.д.	233 тыс. т/год	316 тыс. т/год**	

* Без крупных городов. ** Эмиссии ВС с территории Европы без учета России фиксированы на уровне 2000 г., эмиссии с территории России усреднены по данным ANT и BCRUS. Выделены шрифтом хорошо соответствующие друг другу оценки суммарной эмиссии от российских источников, а также полученная оценка для севера Евразии в целом.

за месяц или год приведены в табл. 1 — в предположении их неизменности в течение года. Там же указаны границы территорий, которые затем будут упоминаться в тексте. Заметим, что так называемая зона факелов включает не только сами факелы, но и окружающие поселки, котельные, транспортные сети и др., вклад которых в эмиссию ВС в атмосферу значительно меньше выбросов от факелов.

Отметим хорошее соответствие суммарных оценок ANT и BCRUS годовых эмиссий ВС с территории РФ не только по величине (см. табл. 1), но и по пространственному распределению (рис. 1, б, в). Данные MACCity, наоборот, оказываются неудачными для территорий активной нефте- и газодобычи. В результате, по нашим оценкам (см. табл. 1), север Евразии (севернее 52° с.ш.) поставляет в атмосферу немного больше 300 тыс. т ВС в год, из которых примерно две трети с территории России. Эта суммарная величина имеет ошибку не менее 15% только за счет оценок ANT [9].

Наличие в базе MACCity данных по всему Северному полушарию позволяет приблизить к реальности результаты оценок дальнего переноса антропогенного ВС в Арктику — путем учета не только эмиссий с территории России, но и других стран Европы. Тем более что данные MACCity ориентированы именно на крупные города и мегаполисы [1]. В результате для дальнейших расчетов в качестве оценок антропогенных эмиссий ВС нами использовались данные MACCity для всей территории севера Евразии, но с заменой на данные BCRUS для территории России.

Эмиссии ВС от природных пожаров, в отличие от антропогенных источников, принципиально меняются в течение года: зимой они отсутствуют, а в теплое время года площади пожаров, их расположение и эмиссии загрязняющих веществ в атмосферу меняются непрерывно. Рис. 2 показывает (при явном сходстве общих черт) довольно заметные отличия внутри- и межгодовых вариаций эмиссий ВС от пожаров в России, обнаруживаемые в разных исходных данных (GFED и RLH), что, скорее всего, обусловлено спецификой и погрешностями (и их причинами) используемых методик получения информации об этих эмиссиях, анализ и обсуждение которых выхо-

дит далеко за рамки данной работы. В любом случае, хорошо видны сильная межгодовая изменчивость годовых пожарных эмиссий ВС в целом (рис. 2, а, в), а также колебания эмиссий за месяц в теплый период года (рис. 2, б, г). Межгодовые вариации пространственных распределений пожаров по территории России также весьма значительны (данные GFED и [11, 12]), что делает малоинформативными средние показатели пожарных эмиссий и их влияния.

Подчеркнем заметное превышение величин пожарных эмиссий ВС в базе GFED (см. рис. 2, а, б) над отечественными оценками RLH (см. рис. 2, в, г; табл. 2). Это также отражает существенные методические различия обоих подходов и требует серьезного анализа. По данным табл. 1 и 2, величина эмиссии ВС от пожаров на территории России в летние месяцы в среднем примерно такая же (но с большими межгодовыми вариациями), как от антропогенных источников (по данным GFED — примерно в полтора раза выше, по RLH — примерно во столько же раз ниже). Поэтому для оценок дальнего переноса ВС в Арктику в настоящей работе мы используем пространственные распределения эмиссии ВС от пожаров по данным как GFED, так и RLH. В анализ включены ежегодные средние эмиссии за месяц, рассчитанные по трем летним месяцам для каждого из этих двух массивов, что несколько сглаживает различия между летними месяцами, видные на рис. 2, б, г.

Методика расчетов атмосферного переноса аэрозольных примесей в арктические районы [14] (см. краткое далее) учитывает эмиссии ВС с территории севернее 52° с.ш. (для России это больше 90% площади), поскольку эффективность поступления загрязнений в Арктику с более южных территорий очень низка [11, 15].

Методика оценок дальнего атмосферного переноса ВС в Арктику

Пункты, для которых проводились оценки, находятся на Кольском п-ове (КОЛ — 67° с.ш., 38° в.д.), в Архангельской обл. (АРХ — 62° с.ш., 48° в.д.), на территориях Ненецкого (НЗ — 67° с.ш., 53° в.д.), Гыданского (ГЗ — 72,4° с.ш., 76,7° в.д.)

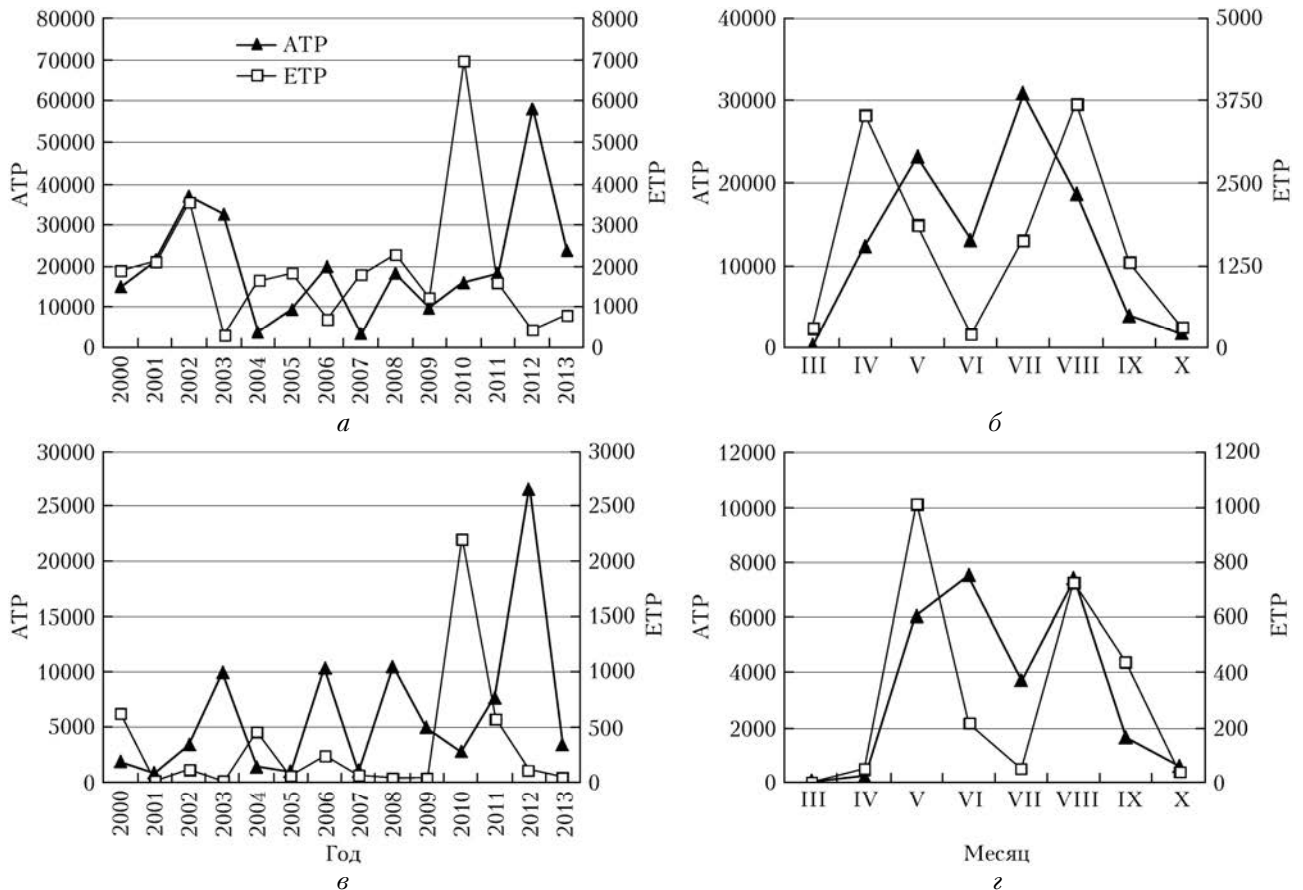


Рис. 2. Средние за лето межгодовые (а, в) и средние (за 14 лет) внутригодовые (б, г) вариации эмиссий ВС от пожаров в России (отдельно для ETP и ATP севернее 52° с.ш.): по данным GFED (а, б) и RLH (в, г), т/мес

Таблица 2

Летние эмиссии ВС от пожаров на территории России по разным данным, тыс. т/мес

База данных	Средняя эмиссия	Минимальная (годы)	Максимальная (год)
GFED	22,5	5,5 (2004, 2007)	59 (2012)
RLH	6,5	1,0 (2001, 2005)	26,7 (2012)

и Усть-Ленского (УЛЗ – 72,5° с.ш., 125,5° в.д.) природных заповедников, расположенных в дельтах рек Печора, Обь и Лена соответственно. Таким образом, охвачено почти все побережье Российской Арктики, за исключением самых восточных районов, где влияние российских антропогенных источников минимально [16].

Направления движения воздуха и эффективность дальнего переноса примеси к выбранным пунктам определялись методом статистики траекторий движения воздушных масс [14, 16, 17] по массивам обратных траекторий, рассчитанных с помощью модели HYSPLIT4 по результатам реанализа метеорологических данных на сайте Лаборатории воздушных ресурсов (<http://www.arl.noaa.gov/ready>). Рассматривались ежедневные пятисуточные обратные траектории (старт в 00:00 UTC на высоте 50 м, шаг расчетов 1 ч) для января (зима) и июля (лето) для каждого из 14 годов (2000–2013 гг.).

Концентрация примеси C_{ij} в приземном воздухе рассматриваемого пункта, созданная в результате

выбросов Q_{ij} примеси на поверхности в ячейке сетки с координатами (ij) , вычисляется по формуле

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

Здесь Z_{ij} – функция чувствительности к потенциальным источникам примеси в ячейке (ij) . Величина ее рассчитывается по массиву обратных траекторий и определяется не только количеством траекторий, прошедших через ячейку (ij) , но и выведением примеси на поверхность по мере переноса. Эффективность последнего процесса, в свою очередь, зависит от качества поверхности, над которой происходит перенос примеси, от характеристик атмосферы по пути переноса (высота слоя перемешивания, осадки), от длины пути и длительности переноса.

Предполагается, что ВС переносится в атмосфере как массивная примесь на аэрозольных частицах субмикронного размера. Проблемы параметризации соответствующих показателей для ВС обсуждались в [1, 2, 8, 15]. Обычно скорость осаждения такой примеси на поверхность ниже (на порядок и более)

зимой, чем летом. Поэтому концентрация примеси в воздухе в удаленном от источников районе выше зимой, чем летом (если эмиссии источников неизменны в течение года). Суммируя вклады от всех ячеек, рассчитанные по формуле (1), получаем концентрацию примеси в воздухе в районе конкретного пункта, для которого строились обратные траектории. Все расчеты ведутся на сетке $1^\circ \times 1^\circ$. Подробное описание нашей последней версии этой методики представлено в [14].

Концентрации ВС в воздухе арктических районов и вклады разных источников

Рассмотрим результаты расчетов концентрации ВС в воздухе на севере России, полученные при использовании тех величин эмиссий ВС, которые были выбраны выше. Включение в расчеты эмиссий зарубежной Европы (по данным MACCity) позволило показать, что эти территории играют малую роль в загрязнении окружающей среды Российского Севера черным углеродом. На Кольском п-ове в зимнее время средний вклад в атмосферную концентрацию ВС от источников зарубежной Европы максимален и составляет около 5%. Поэтому далее будут обсуждаться только российские источники ВС, для которых, как уже говорилось, выбраны антропогенные эмиссии из базы BCRUS.

Расчеты атмосферных концентраций ВС, создаваемых эмиссиями от природных пожаров (GFED и RLH), показывают, что каждый год отклонения этих двух результатов от их среднего значения не превышают $\pm 25\%$. Поэтому далее для оценки вклада пожарных эмиссий ВС для каждого года использовались средние величины концентраций ВС от пожаров, рассчитанные по двум массивам эмиссий.

Концентрации ВС в воздухе всех пяти рассматриваемых пунктов зимой и летом показаны на рис. 3, *a–d* — по годам. Там же приведены соотношения вкладов в эти концентрации отдельно пожаров (П), зоны факелов (Ф) и остальных антропогенных источников (А–Ф). Средние относительные (за 14 лет) вклады этих групп источников в концентрации ВС представлены на рис. 3, *e*.

В первую очередь отметим сильную межгодовую изменчивость концентрации ВС в каждом пункте. Основные причины: (i) сильные вариации атмосферной циркуляции год от года и, как следствие, различия путей переноса и вкладов источников ВС — как зимой, так и летом; (ii) значительные вариации мощностей и пространственного распределения пожаров год от года — только летом. Первое обстоятельство сказывается тем сильнее, чем более компактно локализованы и дальше расположены наиболее значимые для данного пункта источники выбросов ВС в атмосферу (т.е. чем легче воздушным массам не захватить загрязнения из этих источников). Эффект от многообразия пожаров добавляется летом в отдельные годы, особенно в АРХ, НЗ и УЛЗ.

По рис. 3, *a, б* хорошо видно, что в районы пунктов КОЛ и АРХ черный углерод поступает преимущественно от антропогенных источников, причем от зоны факелов, расположенных значительно восточнее, — не больше 5%. Вклад пожаров в АРХ выше из-за более южного расположения этого пункта. Отметим минимальное общее загрязнение на Кольском п-ве летом 2010 г., когда в центре ЕТР происходили мощнейшие пожары [18]. Как ни странно, именно сильное и достаточно продолжительное нарушение нормальных условий циркуляции атмосферы над Восточной Европой (атмосферный блокинг) летом 2010 г., вызвавшее засуху, пожары и задымление атмосферы, и послужило причиной существенного снижения эффективности атмосферного переноса любых загрязнений в самые северные районы [12]. В районе пункта АРХ этот эффект не столь заметен, поскольку этот пункт часть времени попадал в зону антициклона, формирующего блокинг [18]. Таким образом, аномально сильные пожары не обязательно сильно загрязняют Арктику, как это предполагается *a priori*.

Отметим большой вклад эмиссий от факелов предприятий нефте- и газодобычи в загрязнение районов НЗ и ГЗ (зимой больше 95 и 70%, соответственно, рис. 3, *в, г*). При этом в НЗ, расположенном в непосредственной близости от месторождений углеродсодержащих ископаемых в районе Нарьян-Мара и южнее, концентрация ВС в воздухе, по оценкам на базе BCRUS, круглогодично должна быть в среднем на уровне 20–30 мкг/м³, что кажется завышенной оценкой, которую необходимо проверять натурными измерениями. Такие концентрации ВС в приземном воздухе характерны для промышленных городов и мегаполисов (Пекин, Мехико, Лос-Анжелес [19, 20], Тюмень, Новосибирск [21]). С удалением от зоны факелов (в ГЗ, рис. 3, *г*) концентрация ВС в воздухе заметно снижается.

Остановимся на этом вопросе несколько подробнее, поскольку эмиссии ВС в атмосферу от факелов сжигания попутного газа до сих пор изучены недостаточно и оценены с большими погрешностями [22]. По рис. 3, *в* кажется, что в пункте НЗ все решает вклад факелов в загрязнение воздуха черным углеродом. Сделаем аналогичные оценки, используя для зоны факелов эмиссии ВС, полученные в [9] по ANT (рис. 4). Из табл. 1 видно, что отличие суммарных оценок эмиссии ВС от зоны факелов по данным BCRUS и ANT невелико. Однако во втором случае (эмиссии ANT) концентрация ВС в районе НЗ на порядок ниже (ср. рис. 3, *в* и 4, *а*), чем при эмиссиях BCRUS, хотя факелы также являются основным источником ВС, относительная роль пожаров летом более заметна (рис. 4, *б*). Это связано не только с абсолютными значениями разных базовых эмиссий ВС, но и с различными их пространственными распределениями. Для остальных (более удаленных) пунктов такая замена исходных данных об эмиссиях ВС в зоне факелов не меняет существенно конечные результаты — как в отношении абсолютных значений концентрации ВС в воздухе, так и в соотношениях вкладов источников.

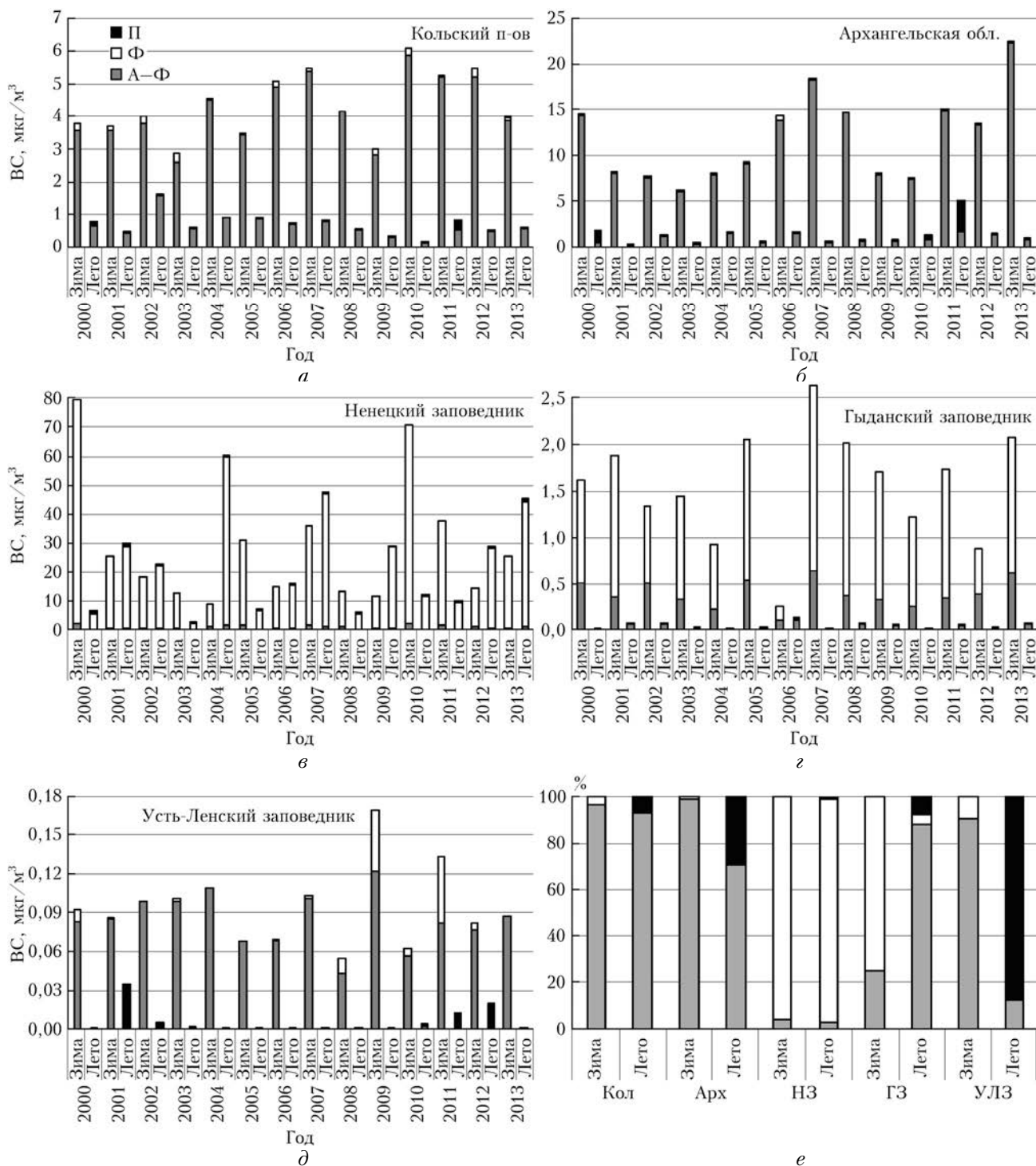


Рис. 3. Вклады разных источников (пожаров П, зоны факелов Ф и остальных антропогенных источников А–Ф) в концентрацию ВС в воздухе северных районов России: КОЛ (а), АРХ (б), НЗ (в), ГЗ (г), УЛЗ (д); относительные средние (за 14 лет) доли этих вкладов (е). Эмиссии ВС оценивались по данным BC-RUS

В табл. 3 приведены итоговые оценки средних значений концентрации ВС в воздухе рассматриваемых пунктов Севера России (зимой и летом), полученные в данной работе. Там же указаны относительные стандартные отклонения (ОСО) как мера межгодовой изменчивости этих значений в течение 14 лет и основные источники этой изменчивости. Для

НЗ приведены результаты двух оценок – по разным данным об эмиссиях ВС в зоне факелов. В случае, когда причиной изменчивости являются антропогенные вклады в концентрацию ВС, физическим механизмом изменчивости является вариативность условий циркуляции атмосферы от года к году, поскольку антропогенные эмиссии ВС фиксированны.

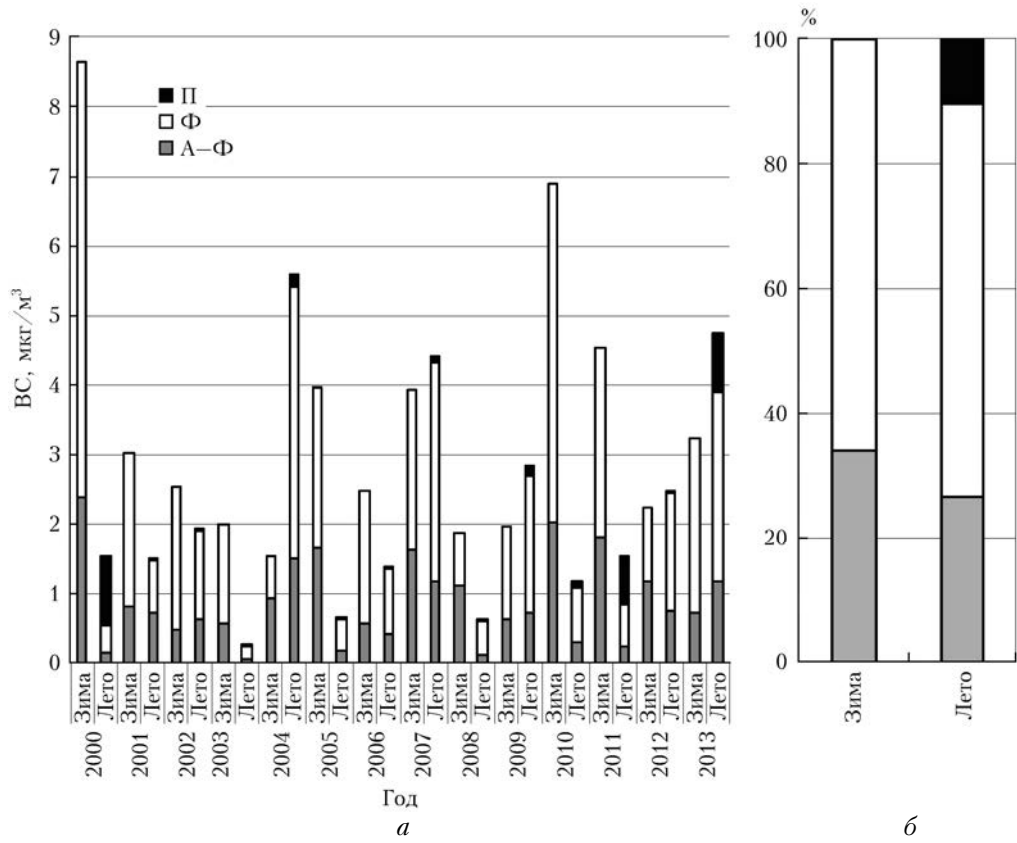


Рис. 4. В воздухе НЗ: абсолютные (а) и средние (за 14 лет) относительные (б) вклады разных источников (пожаров П, зоны факелов Ф и остальных антропогенных источников А–Ф) в концентрацию ВС. Для зоны факелов эмиссии ВС оценивались по АНТ

Таблица 3

Средние значения концентрации ВС (мкг/м³) в воздухе пяти рассматриваемых пунктов

Сезон	КОЛ	АРХ	НЗ	ГЗ	УЛЗ
Зима	4,3	12	29	1,5	0,095
	(23%, А–Ф)	(40%, А–Ф)	(76%, Ф) 3,5* (60%*, А)	(40%, Ф)	(32%, А)
Лето	0,70	1,3	22	0,05	0,0060
	(50%, А–Ф)	(92%, П)	(78%, Ф) 2,2* (75%*, А)	(78%, А–Ф)	(170%, П)

* При замене антропогенных эмиссий в зоне факелов BCRUS на оценки АНТ. В скобках – ОСО и источник наибольшего вклада в межгодовую изменчивость. Антропогенные источники (А) включают и эмиссии от зоны факелов.

Когда изменчивость определяется в основном вкладами пожаров (например, летом в УЛЗ), это физически соответствует совокупности изменений как циркуляции атмосферы, так и пожарных эмиссий, и не только интенсивности выбросов ВС от пожаров, но и их пространственного расположения. Поэтому, в частности, ОСО всегда летом выше, чем зимой.

Отметим, что имеющиеся данные натуральных измерений концентрации ВС в воздухе вблизи НЗ – в районах Печорского и Карского морей [23, 24] – не показывают экстремально высоких значений (сред-

ние величины 10–100 нг/м³, максимумы порядка единиц мкг/м³). Однако эти измерения выполнены в отдельных морских экспедициях летом или в начале осени, когда (из-за высоких скоростей осаждения аэрозолей на поверхность) загрязнение, переносимое атмосферными потоками от удаленных источников, должно быть минимально. Поэтому проведение более продолжительных измерений содержания ВС в воздухе в этом районе и в других районах на Севере России могло бы дать весьма интересную и актуальную информацию.

Другой причиной полученных высоких значений концентраций ВС в воздухе в НЗ может быть недостаток примененной методики модельных расчетов, где не учитывалась отдельно высотность выбросов ВС в атмосферу некоторыми источниками (факелы, верховые пожары), все эмиссии считались расположенными на поверхности. Эту часть совершенствования методики предстоит решать как ближайшую задачу в рамках дальнейших исследований по тематике данной работы.

Заключение

Проведено сопоставление величин эмиссии черного углерода с территории России, полученных на основе разных данных (статистика РФ и спутниковая информация). Для расчетов выбраны антропогенные эмиссии ВС — для севера Восточного полушария из MACCity и для территории России из BCRUS, с последующей коррекцией для зоны факелов. Получено, что север Евразии (севернее 52° с.ш.) поставляет в атмосферу около 315 тыс. т ВС в год, из которых примерно две трети — с территории России.

Анализ вкладов пожаров на территории России в содержание ВС в северных районах показывает, что наилучшей оценкой для каждого года (с погрешностью $\pm 25\%$) можно считать средний вклад от пожаров, рассчитанный по двум распределениям величин эмиссий (GFED и RLH). При этом средняя эмиссия ВС от летних пожаров в России (севернее 52° с.ш.) по данным GFED примерно в 3 раза выше, чем по данным RLH.

В разных пунктах Российской Арктики значения концентрации ВС в приземном воздухе могут различаться в 100 и более раз. Основные факторы, формирующие содержание черного углерода в разных районах:

— северо-запад (пункты КОЛ и АРХ): основной вклад в загрязнение воздуха черным углеродом — от антропогенных источников (от факелов зимой меньше 5%); средний вклад — от пожаров летом (на Кольском п-ове менее 10%, в Архангельской области около 25%, из-за более южного расположения этого пункта). Летом 2010 г. на Кольском п-ове влияние всех источников загрязнения было минимальным за счет аномальной циркуляции атмосферы;

— центр (пункты НЗ и ГЗ): высока роль эмиссий факелов открытого сжигания попутных газов при нефте- и газодобыче. В НЗ зимой и летом вклад этих источников больше 65% (до 95% при оценках эмиссий по данным BCRUS), в ГЗ зимой — больше 70%. В ГЗ летом средний вклад ВС от зоны факелов примерно равен вкладу от пожаров (около 5%), в НЗ вклад пожарных эмиссий ВС еще меньше;

— самый восточный пункт УЛЗ: летом и зимой концентрация ВС в воздухе очень мала — на порядок ниже, чем в ГЗ; сильные межгодовые вариации концентрации ВС и вкладов всех групп источников; в отдельные годы зимой вклады зоны факелов могут быть до 30%, летом основной вклад дают пожары на АТР.

Таким образом, межгодовые и межсезонные различия концентраций ВС в воздухе Российской Арктики столь велики, что результаты измерений содержания ВС в воздухе одного пункта в течение одного сезона или даже одного года не должны быть основой для долгосрочных выводов и прогнозов в отношении всего региона.

Авторы благодарны коллегам Н.С. Смирнову и В.Н. Короткову за помощь при обработке данных пожарных эмиссий, а также организаторам сайта Лаборатории воздушных ресурсов за возможность пользоваться программой HYSPLIT.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 14-05-00059, 17-05-00245).

1. *Evangelou 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.
2. *Huang K., Fu J.S., Prikhodko V.Y., Storey J.M., Romanov A., Hodson E.L., Cresko J., Morozova I., Ignatieva Y., Cabaniss J.* Russian anthropogenic black carbon: Emission reconstruction and Arctic black carbon simulation // *J. Geophys. Res. Atmos.* 2015. V. 120. DOI: 10.1002/2015JD023358.
3. *Горчакова И.А., Мохов И.И.* Радиационный и температурный эффекты дымового аэрозоля в Московском регионе в период летних пожаров 2010 г. // *Изв. АН. Физ. атмосфер. и океана.* 2012. Т. 48, № 5. С. 558–565.
4. *Panchenko M.V., Zhuravleva T.B., Kozlov V.S., Nasrtdinov I.M., Pol'kin V.V., Terpugova S.A., Chernov D.G.* Estimation of aerosol radiation effects under background and smoke-haze atmospheric conditions over Siberia from empirical data // *Russian Meteorol. Hydrol.* 2016. V. 41, N 2. P. 104–111. DOI: 10.3103/S1068373916020047.
5. *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.
6. *Кароль И.Л., Киселев А.А., Генрихович Е.Л., Чичерин С.С.* Сокращение выбросов короткоживущих атмосферных примесей как альтернативная стратегия замедления изменений климата // *Изв. АН. Физ. атмосфер. и океана.* 2013. Т. 49, № 5. С. 503–522.
7. *IPCC, Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Core Writing Team, R.K. Pachauri, L.A. Meyer (eds.). IPCC, Geneva, 2014. 151 p.*
8. *AMAP Assessment 2015: Black carbon and ozone as Arctic climate forcers. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP). Oslo: Norway. vii+, 2015. 116 p. ISBN 978-82-7971-092-9.*
9. *Виноградова А.А.* Эмиссии антропогенного черного углерода в атмосферу: распределение по территории России // *Оптика атмосфер. и океана.* 2014. Т. 27, № 12. С. 1059–1065; *Vinogradova A.A.* Anthropogenic black carbon emissions to the atmosphere: Surface distribution through Russian Territory // *Atmos. Ocean. Opt.* 2015. V. 28, N 2. P. 158–164.

10. Смирнов Н.С., Коротков В.Н., Романовская А.А. Выбросы черного углерода от природных пожаров на землях лесного фонда Российской Федерации в 2007–2012 гг. // Метеорол. и гидрол. 2015. № 7. С. 5–17.
11. Виноградова А.А., Смирнов Н.С., Коротков В.Н., Романовская А.А. Лесные пожары в Сибири и на Дальнем Востоке: эмиссии и атмосферный перенос черного углерода в Арктику // Оптика атмосфер. и океана. 2015. Т. 28, № 6. С. 512–520; Vinogradova A.A., Smirnov N.S., Korotkov V.N., Romanovskaya A.A. Forest fires in Siberia and the Far East: Emissions and atmospheric transport of black carbon to the Arctic // Atmos. Ocean. Opt. 2015. V. 28, N 6. P. 566–574.
12. 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 6. P. 545–550.
13. Ежегодник выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух городов и регионов Российской Федерации за 2010 год / Под ред. А.Ю. Недре. СПб.: ОАО «НИИ Атмосфера», 2011. 560 с.
14. Виноградова А.А. Дистанционная оценка влияния загрязнения атмосферы на удаленные территории // Геофизические процессы и биосфера. 2014. Т. 13, № 4. С. 5–20.
15. 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.
16. 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 Arctic (1986–2010) // Atmos. Ocean. Opt. 2012. V. 25, N 6. P. 414–422.
17. Hirdman D., Sodemann H., Eckhardt S., Burkhardt J.F., Jefferson A., Mefford T., Quinn P.K., Sharma S., Strom J., Stohl A. Source identification of short-lived air pollutants in the Arctic using statistical analysis of measurement data and particle dispersion model output // Atmos. Chem. Phys. 2010. V. 10, N 2. P. 669–693.
18. Ситнов С.А. Оптическая толща аэрозоля и общее содержание оксида углерода над европейской территорией России в период массовых пожаров лета 2010 г.: взаимосвязь изменчивости загрязнений и метеорологических величин // Изв. АН. Физ. атмосфер. и океана. 2011. Т. 47, № 6. С. 774–789.
19. 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_{2.5}, data from two urban sites in Guadalajara, Mexico during 2008 // Atmos. Pollution Res. 2011. V. 2. P. 358–365. DOI: 10.5094/APR.2011.040.
20. 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 concentrations in regions with different anthropogenic loadings // Atmos. Ocean. Opt. 2009. V. 22, N 4. P. 421–427.
21. 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.
22. 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.
23. 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. АН. 2015. Т. 461, № 1. С. 70–74.
24. Копейкин В.М., Репина 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., Repina 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.

A.A. Vinogradova, A.V. Vasileva. Atmospheric black carbon in the northern Russia: sources, spatial and temporal variations.

Model estimates of air black carbon (BC) concentrations at different sites of the Russian North were made for 2000–2013. Different physical sources of BC emissions (anthropogenic and from wildfires), their intensities (from different databases), and their contributions to BC air concentrations in the Arctic are discussed for winter and summer. We used GFED, MACCity, and other satellite data, as well as the ground-based data of Russian official statistics on pollution emissions to the atmosphere. Long-range atmospheric transport of BC was modeled by analysing back-trajectory statistics from ARL NOAA (HYSPLIT model).

In total, anthropogenic BC inputs exceed wildfire ones in surface air BC concentrations even in summer when contributions from distant anthropogenic sources are minimal. Annual and interannual variations in BC air concentrations are sizable. Variations in air BC concentration along the Russian Arctic coast may be above two orders with maximal values near Nenetsky Nature Reserve (near the Pechora River delta). There are open flares of oil/gas mining companies with extreme BC emissions in close proximity to this site. So, the results measured at one point and/or during a season or even a year should not be the basis for long-term conclusions and forecasts in relation to the entire region.