

УДК 551.583

ЗАГРЯЗНЕНИЕ ВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ В ЦЕНТРАЛЬНОЙ КАРЕЛИИ ПРИ ДАЛЬНЕМ ПЕРЕНОСЕ АНТРОПОГЕННЫХ ПРИМЕСЕЙ В АТМОСФЕРЕ

© 2013 г. А.А. Виноградова*, Ю.А. Иванова**

* Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН

** Московская государственная академия тонкой химической технологии
им. М.В. Ломоносова, Москва

Поступила в редакцию 24.05.2012 г.

Проанализированы закономерности дальнего переноса воздушных масс и антропогенных примесей в центральные районы Карелии. Определены вклады промышленных комплексов и регионов (Мурманская, Архангельская и Ленинградская области, Санкт-Петербург, г. Костомукша) в загрязнение среды в рассматриваемых пунктах. Оценены средние концентрации в воздухе и в осадках антропогенных Cu, Ni, Fe, Al и сажи, поступающих от этих источников, а также их потоки из атмосферы на подстилающую поверхность.

Введение. Данная работа выполнена в рамках проекта, целью которого является изучение антропогенного влияния на окружающую среду особо охраняемых природных территорий (ООПТ) севера России, и продолжает серию публикаций по этой теме [5, 9, 10, 26, 35, 38].

Состояние природной среды любого региона в значительной степени определяется процессами циркуляции атмосферы, от которых зависят длительность и направления переноса воздушных масс и, следовательно, источники и стоки переносимых ими примесей. Заповедники и заказники выделены для сохранения и изучения природы в ее естественном состоянии, поэтому *a priori* предполагается минимальное антропогенное влияние на эти территории. Однако при современном развитии индустрии в условиях продвижения человека с его жизнеобеспечивающей инфраструктурой во все более труднодоступные районы практически невозможно избежать антропогенного воздействия на окружающую среду даже самых изолированных территорий. Это воздействие необходимо оценивать, учитывать и, по возможности, минимизировать.

Огромные пространства Российской Арктики и Субарктики, примыкающие к Северному Ледовитому океану, пока очень слабо изучены экспериментально с точки зрения состава и свойств природной среды и, в частности, атмосферы. Понятно, что мониторинг загрязнения природ-

ных сред и объектов на такой площади имеет серьезные экономические и технические ограничения. Экспериментальные работы выполняются эпизодически в ходе научных экспедиций ряда институтов и ведомств. Наиболее регулярными можно считать точечные наблюдения на сети Росгидромета [22], исследования сотрудников Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН в морях Российской Арктики и на их прибрежных территориях [25, 35], а также появившиеся в последние годы результаты круглогодичного мониторинга состава атмосферы на станции ЗОТТО в Центральной Сибири [39], поэтому модельные оценки антропогенного загрязнения атмосферы и потоков примесей из атмосферы на поверхность актуальны для анализа и прогноза экологической ситуации на труднодоступных и особо охраняемых территориях.

На территории России существует несколько более или менее локализованных крупных промышленных регионов (например, Урал, район Норильска, Кольский полуостров и др.), являющихся мощными источниками загрязнений глобального масштаба. Их атмосферные эмиссии разносятся воздушными потоками на расстояния до 10 тысяч километров, достигая американского материка [27, 33]. Один из наиболее эффективных стоков аэрозольной примеси из атмосферы – осаждение на подстилающую поверхность. Скорость этого процесса зависит не только от свойств воздушной

массы (влажность, осадки) и самих аэрозольных частиц (размеры, гигроскопичность и др.), но и от качества подстилающей поверхности (растительность, снег, лед и др.), над которой происходит движение. Таким образом, процессы циркуляции атмосферы определяют не только источники загрязнений, переносимых воздушными потоками, но и эффективность их стоков на поверхность. Многообразие климатических зон, существующих на территории нашей страны, усложняет модельное описание и параметризацию процессов переноса загрязнений воздушными массами [8].

В последние 10–15 лет траекторный подход стал применяться не только при изучении состава и генезиса конкретных проб воздуха, отбираемых в ходе экспериментальных работ, но также для изучения закономерностей в процессах дальнего переноса воздуха и его составляющих [13, 32, 36]. Метод статистики траекторий (МСТ) дает возможность анализировать средние характеристики процессов циркуляции атмосферы. В результате обнаруживаются источники и стоки различных атмосферных примесей (в качестве последних работ такого типа можно назвать [4, 20, 23, 34]) или, наоборот, изучается пространственное распределение примеси, распространяющейся от конкретных источников [7, 8]. Надежность результатов, получаемых с помощью МСТ, в значительной степени определяется качеством и пространственной плотностью метеорологической информации, на которой основаны расчеты траекторий, достоверностью используемых данных о составе и мощностях выбросов источников примесей, а также способом представления и описания трансформации вещества во время движения в атмосфере.

В данной работе в качестве объекта, подвергающегося антропогенному воздействию, рассматривается центральная часть Карелии – труднодоступный и мало изученный район с хорошо сохранившейся естественной природой. Множество видов животных и птиц, живущих в этих местах, занесено в Красную Книгу России. Однако влияние антропогенных факторов уже сказывается на составе некоторых природных объектов; например, тяжелые металлы накапливаются во мхах и лишайниках [17, 24, 26], которые затем входят в состав пищевых цепочек. Это говорит о необходимости детального постоянного мониторинга загрязнения окружающей среды рассматриваемого региона.

Методы и подходы. *Объекты исследования и исходные данные.* “Пункты наблюдений” данной работы – Костомукшский заповедник (КЗ) и Беломорская биологическая станция имени

Н.А. Перцова МГУ (ББС) – схематически показаны на карте (рис. 1). КЗ расположен на границе России и Финляндии и является частью международного Российско-Финского заповедника “Дружба”. ББС МГУ находится на берегу Кандалакшского залива Белого моря. Расстояние между пунктами около 200 км.

Перенос воздуха к КЗ (с условными географическими координатами 64.57° с.ш., 30.67° в.д.) и ББС (с координатами 66.33° с.ш. и 33.07° в.д.) изучался по траекториям движения воздушных масс на высоте 100 м от поверхности земли. Двухс точные трехмерные траектории переноса воздуха к этим пунктам (старт в 0 часов UTC, интервал счёта 6 часов) вычислялись и строились на картах для каждого дня января, апреля, июля и октября с помощью модели HISPLYT 4 и данных реанализа полей метеорологических характеристик NOAA (NCEP/NCAR Reanalysis Data Files) [29]. Анализировались массивы траекторий за 20 лет (с 1990 по 2009 г.) для КЗ и за 10 лет (с 2001 по 2010 г.) для ББС. Изучались средние (за 10 лет) пространственные распределения траекторий для каждого месяца и для года в целом.

Методика оценок переноса аэрозольных примесей в атмосфере, их концентраций в воздухе и потоков на подстилающую поверхность подробно описана в [11, 38], поэтому кратко остановимся лишь на основных формулах, допущениях и значениях параметров, принятых для данного исследования. Наш подход и все дальнейшие результаты и выводы относятся к так называемой консервативной примеси, переносимой в атмосфере на аэрозольных частицах, пассивной по отношению к химическим преобразованиям в воздухе во время переноса, или к отдельным микроэлементам, идентификация которых возможна вне зависимости от конкретного химического состава аэрозольного вещества.

Из уравнения баланса массы при переносе примеси вдоль траектории движения воздуха от каждого источника следует, что концентрация C_{ij} примеси, создаваемая источником i в пункте j , может быть представлена следующим образом:

$$C_{ij} = Q_i (1 - \alpha) Z_{ij}, \quad (1)$$

где Q_i – мощность эмиссии примеси в единицу времени; $\alpha = 0.15$ – доля примеси, оседающая на поверхность вблизи источника [3, 31]; Z_{ij} – функция потенциального воздействия источника i на состав воздуха в пункте j . Z_{ij} характеризует все атмосферные процессы, влияющие на аэрозольную примесь по пути движения от источника i пункту j , и зависит от вероятности и длительности

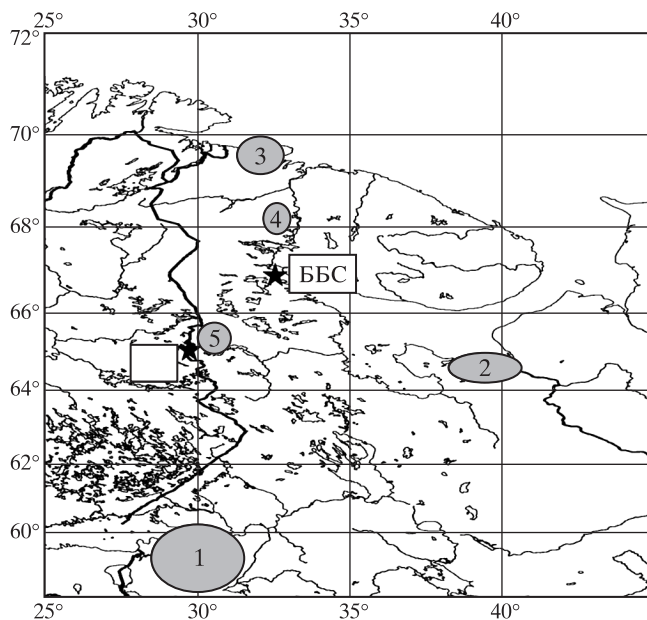


Рис. 1. Расположение пунктов наблюдений КЗ и ББС (звёздочки) и регионов-источников антропогенных примесей: 1 – Ленинградская обл., 2 – Архангельск, 3 – Никель + Мурманск, 4 – Мончегорск, 5 – Костомукша.

ти движения воздуха между этими пунктами, а также от условий вертикального перемешивания и скорости выведения примеси из атмосферы во время переноса:

$$Z_{ij} = \frac{A_{ij}}{2\pi H_j b} \sum_{n=1}^8 \frac{P_{ij}(n) t_n \exp[-Kt_n/H_j]}{[L_{ij}(n)]^2}, \quad (2)$$

где A_{ij} – вероятность (частота) движения воздуха от источника i к пункту j ; $P_{ij}(n)$ – вероятность (частота) того, что воздух от источника i к пункту j движется в течение $6n$ часов (при 6-часовой дискретности расчета траекторий); H_j – высота слоя перемешивания; $L_{ij}(n)$ – длина траекторий между источником i и пунктом j при длительности движения $6n$ часов; $K = k_d + WP$ – скорость осаждения примеси на подстилающую поверхность, определяющаяся сухим (k_d) осаждением и осаждением осадками (W – эффективность захвата примеси осадками, P – количество осадков в единицу времени); t_n – длительность $6n$ часов в секундах; b – параметр размывания воздушного потока в горизонтальном направлении, перпендикулярном траектории, который, по оценкам [3], при дальнем переносе примеси приблизительно равен 0.1–0.2.

На основе литературных данных о стратификации приземного слоя атмосферы в северных регионах России [21] и результатов расчетов этого параметра по программе HYSPLIT4 на сайте

ARL NOAA [29] средние значения H выбирались следующими: 250 м зимой и весной, 500 м летом и осенью – для всех источников, поскольку они расположены в одном климатическом поясе и обладают сходными климатическими характеристиками (рис. 1).

При дальнем атмосферном переносе аэрозоля по мере удаления от источника осаждение (сухое и осадками) на поверхность способствует сжатию спектра размеров остающихся в воздухе частиц к субмикронному диапазону, т.е. диапазону 0.1–1 мкм [12]. Это приводит к уменьшению и выравниванию скоростей осаждения аэрозольных частиц, переносящих различные примеси, и к увеличению времени переноса (времени жизни примеси в атмосфере). Значения скорости осаждения на поверхность K не различались нами для разных примесей. Для расчетов задавались следующие значения K для зимы, весны, лета и осени: 0.1, 0.4, 1.6 и 1.0 см/с соответственно. При выборе этих значений учитывались литературные данные о скорости сухого осаждения субмикронных частиц над различными поверхностями [3, 31], а также климатические характеристики (количество и вид осадков, период снегозалегания, температура воздуха и т.д.) для рассматриваемой территории [2, 17, 19, 24]. Наличие в окрестности ООПТ обильной лесной растительности отражено в повышении на порядок скорости осаждения примесей на поверхность в теплое время года, в период вегетации растений. Кроме того, учтена большая эффективность захвата аэрозольных частиц дождевыми каплями, по сравнению со снегом [33].

Для каждого месяца концентрации примеси в воздухе, создаваемые отдельными источниками (1), суммировались для расчета среднесезонной (за рассматриваемые 10 лет) концентрации примеси C . Поток примеси на поверхность D за время T (месяц, сезон, год) оценивался по формуле

$$D = C \cdot T \cdot K. \quad (3)$$

Рассматриваемые месяцы считались представительными для соответствующих сезонов, изучались сезонные изменения характеристик загрязнения окружающей среды.

Кроме концентрации в воздухе и потока из атмосферы на поверхность, мы оценили также концентрацию примеси в осадках C_p (в дождевой воде или в снеге) – характеристику загрязнения окружающей среды, часто регистрируемую при экспериментальном мониторинге.

Регионы-источники загрязнений. В табл. 1 перечислены пять основных российских источников

выбросов антропогенных аэрозолей в атмосфере, расположенных вблизи (на расстоянии менее 1000 км) рассматриваемого района (рис. 1), и приведены их эмиссии по данным [15] для 2007 г. Названия источников условны: “Ленинградская обл.” – это Санкт-Петербург с Ленинградской областью, “Архангельск” – город и Архангельская область, “Мончегорск” – соответствующий город, “Никель + Мурманск” – Мурманская обл. без Мончегорска, “Костомукша” – Костомукша + открытый карьер горно-обогатительного комбината (ГОК), значения эмиссии которого в атмосферу для железа и алюминия оценены в [6]. В данной работе рассматривались антропогенные примеси, эмиссии которых от данных источников в атмосферу максимальны: никель (Ni), медь (Cu), железо (Fe), алюминий (Al) и сажа (в англоязычной литературе – black carbon или BC). Источники никеля и меди, расположенные на Кольском полуострове, представляют очень мощный антропогенный источник этих металлов в Арктике. Специфика г. Костомукша – в выбросах большого количества железа и алюминия, причем, как показано в [6], главным образом открытым карьером горно-обогатительного комбината (ГОК). Ленинградская область – самый мощный из рассматриваемых источников алюминия. Выбросы сажи особенно значительны от крупных источников (области), они не включают выбросы в результате отопления многочисленных небольших городов и поселков, а также в результате лесных пожаров.

Основные результаты. *Перенос воздушных масс в Центральную Карелию.* На рис. 2 представлены средние соотношения частот поступления воздуха с различных направлений в район Центральной Карелии в 2000-х годах. Подчеркнем, что это не направления ветра (не розы ветров!), а направления на территории, над которыми формируются воздушные массы, поступающие в данный район. Например, если северные (арктические) воздушные массы приносит западный ветер, то в данном случае они отнесены к направлению “север”. Направления в данном случае говорят о происхождении воздушной массы и примесей, которые она несет. На рис. 2 представлены распределения, усредненные по трем пунктам: кроме данных по КЗ и ББС были добавлены данные для центральной части Белого моря из [5]. Различия между пунктами наблюдений невелики и характеризуют локальные особенности циркуляции атмосферы для каждого из них. Таким образом, рисунок 2 характеризует усредненное пространственное распределение поступающих воздушных масс в регион центральной части Карелии и Белого моря в 2000-х годах.

Таблица 1. Эмиссия источников Q (т/год) по данным [15]. $L_{КЗ}$ и $L_{ББС}$ – приблизительные расстояния от КЗ и ББС до источников

	Ленинградская обл.	Архангельск	Никель+Мурманск	Мончегорск	Костомукша
Cu	0.42	0.51	170	619	0.003
Ni	0.9	0.69	351	1.71	0.001
Pb	0.17	0.03	1.23	6.92	0.001
Fe	146	78	–	–	700*
Al	495	–	–	–	220*
Сажа	1515	1672	1234	35.2	73.6
$L_{КЗ}$, км	510	450	500	390	50
$L_{ББС}$, км	710	380	300	190	200

* Для Костомукши Fe и Al – с поправкой на выбросы карьера ГОК Костомукши из [6].

Обратим внимание, что при известном преобладании западных ветров в северной части Евразии большую часть времени в рассматриваемый район поступает холодный и сухой воздух Арктики (север). Далее в порядке убывания: теплый и влажный воздух из Атлантики (запад), а также теплые (юг) и холодные (восток) континентальные воздушные массы.

Подчеркнем, что в эти распределения не входят около 25 % случаев (от 20 до 30% для разных пунктов и сезонов), когда в пределах 2 суток дальний перенос не наблюдался, то есть воздушные массы задерживались над рассматриваемыми пунктами наблюдений в условиях близко расположенного центра циклона или антициклона. Для района КЗ число таких случаев росло (с коэффициентом достоверности $R^2 = 0.5$) в период с 1991 по 2010 г., что может быть связано с увеличением частоты движения над изучаемой территорией атлантических циклонов. Другим наиболее достоверным линейным трендом характеризуется

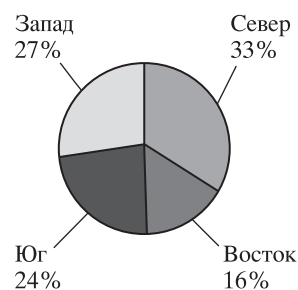


Рис. 2. Соотношение частот дальнего переноса воздушных масс в Центральную Карелию с различных территорий, над которыми формируется их состав (по сторонам света), – для 2000-х годов.

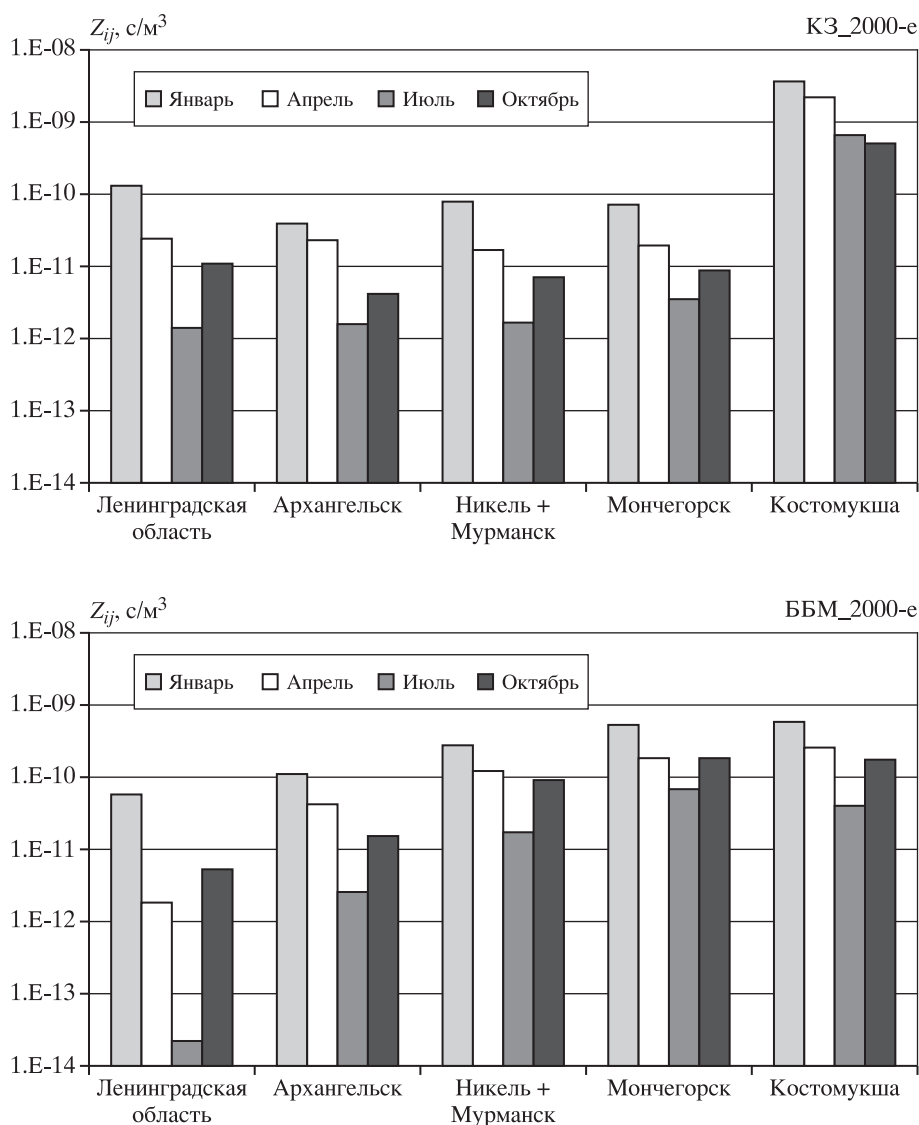


Рис. 3. Величины потенциальной функции Z для разных источников в разные сезоны – в отношении загрязнения атмосферы вблизи КЗ и ББС. Шкала логарифмическая.

частота поступления воздуха из южных районов, которая уменьшалась за рассматриваемые 20 лет ($R^2 = 0.3$). Это качественно соответствует результатам работы [4], где отмечены соответствующие изменения величины и направления меридиональной составляющей скорости ветра в рассматриваемом районе вблизи 70-й широты.

Перенос антропогенных примесей в Центральную Карелию. На рис. 3 приведены диаграммы, отражающие потенциальные возможности рассматриваемых источников внести свой вклад в загрязнение атмосферы вблизи КЗ и ББС в разные сезоны. Различия величины потенциальной функции Z , как видно из формулы (2), зависят главным образом от сильно различающихся вероятностей поступления воздуха A от разных источников и их

удаленности L (табл. 1) от пункта наблюдений, а также – при рассмотрении сезонных вариаций – от скорости осаждения на поверхность K . Остальные параметры различаются не столь значительно. Комбинациями этих факторов и определяются соотношения значений Z , представленные на рис. 3.

Сезонные вариации качественно одинаковы для всех пар “источник–пункт наблюдений”, а именно – Z имеет минимум летом и максимум зимой в соответствии с обратным сезонным ходом скорости осаждения примеси на поверхность. Исключение составляет пара “Костомукша – КЗ”, где из-за близости источника значения Z велики даже летом, когда сток примеси на поверхность на порядок эффективнее, чем зимой.

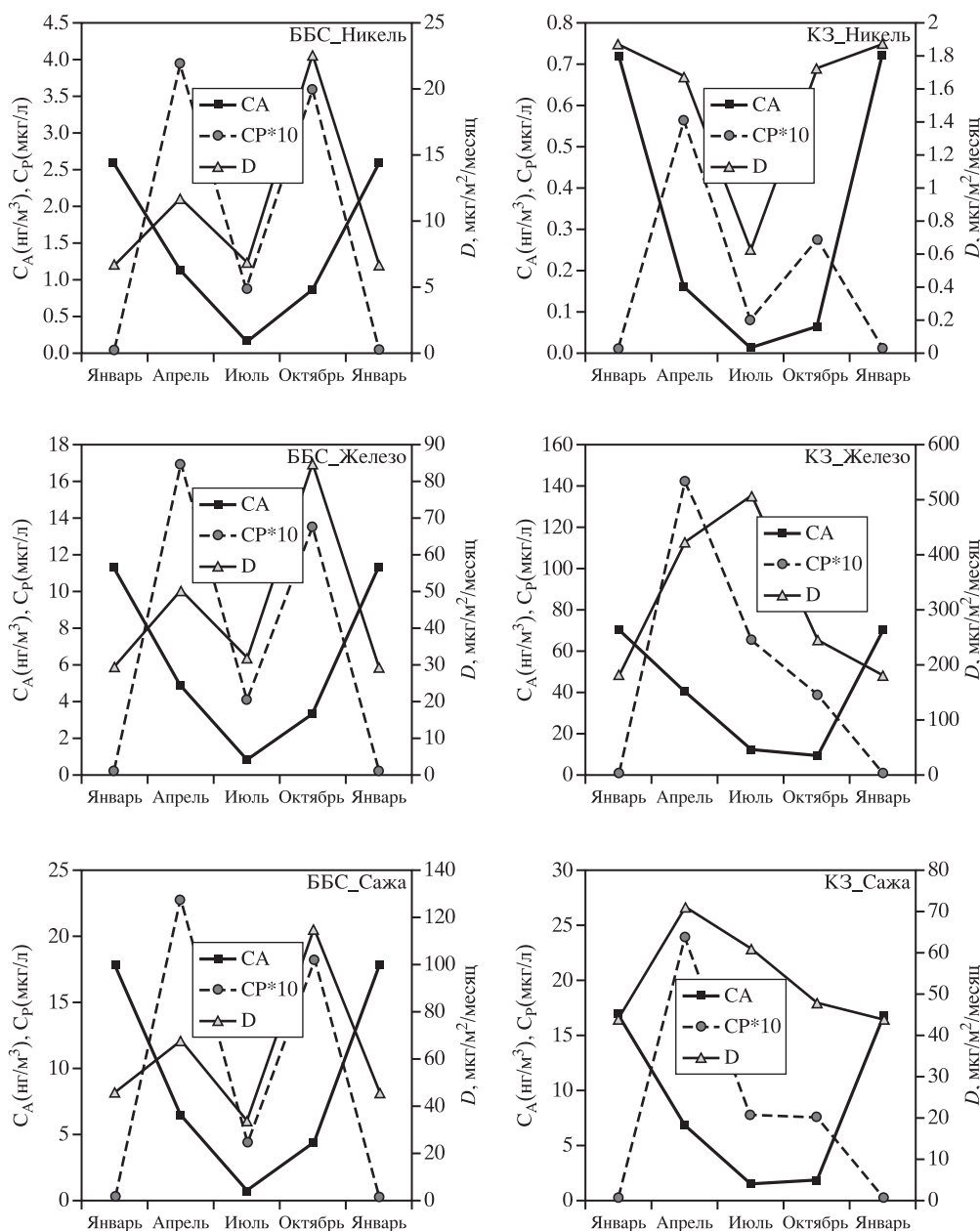


Рис. 4. Сезонные вариации характеристик загрязнения окружающей среды антропогенными никелем, железом и сажей вблизи ББС (слева) и КЗ (справа): C_A и C_p – концентрации в атмосфере и в осадках, соответственно, D – поток на подстилающую поверхность. C_p умножена на 10 для выравнивания шкалы.

Если сравнивать возможности воздействия разных источников на окружающую среду разных районов, то для КЗ потенциально наиболее опасен источник “Костомукша”, расположенный на порядок ближе остальных, а для ББС наиболее значимых источников три: “Костомукша”, “Мончегорск” и “Никель+Мурманск”, но все они менее опасны, чем Костомукша для КЗ. Напомним, что по рис. 3 можно обсуждать потенциальные вклады источников лишь при неявном предположении равенства их эмиссий. Как видно из табл. 1, в реальности это

не так, поэтому, сравнивая разные источники или выявляя наиболее значимые, очень важно определиться, в отношении каких примесей мы анализируем ситуацию, и учесть их эмиссии.

Оценки характеристик загрязнения окружающей среды в Центральной Карелии. Сезонные вариации характеристик загрязнения окружающей среды – концентраций в воздухе и в осадках, а также потока на подстилающую поверхность – для антропогенных никеля, железа и сажи вблизи ББС и КЗ приведены на рис. 4. Мы не приводим

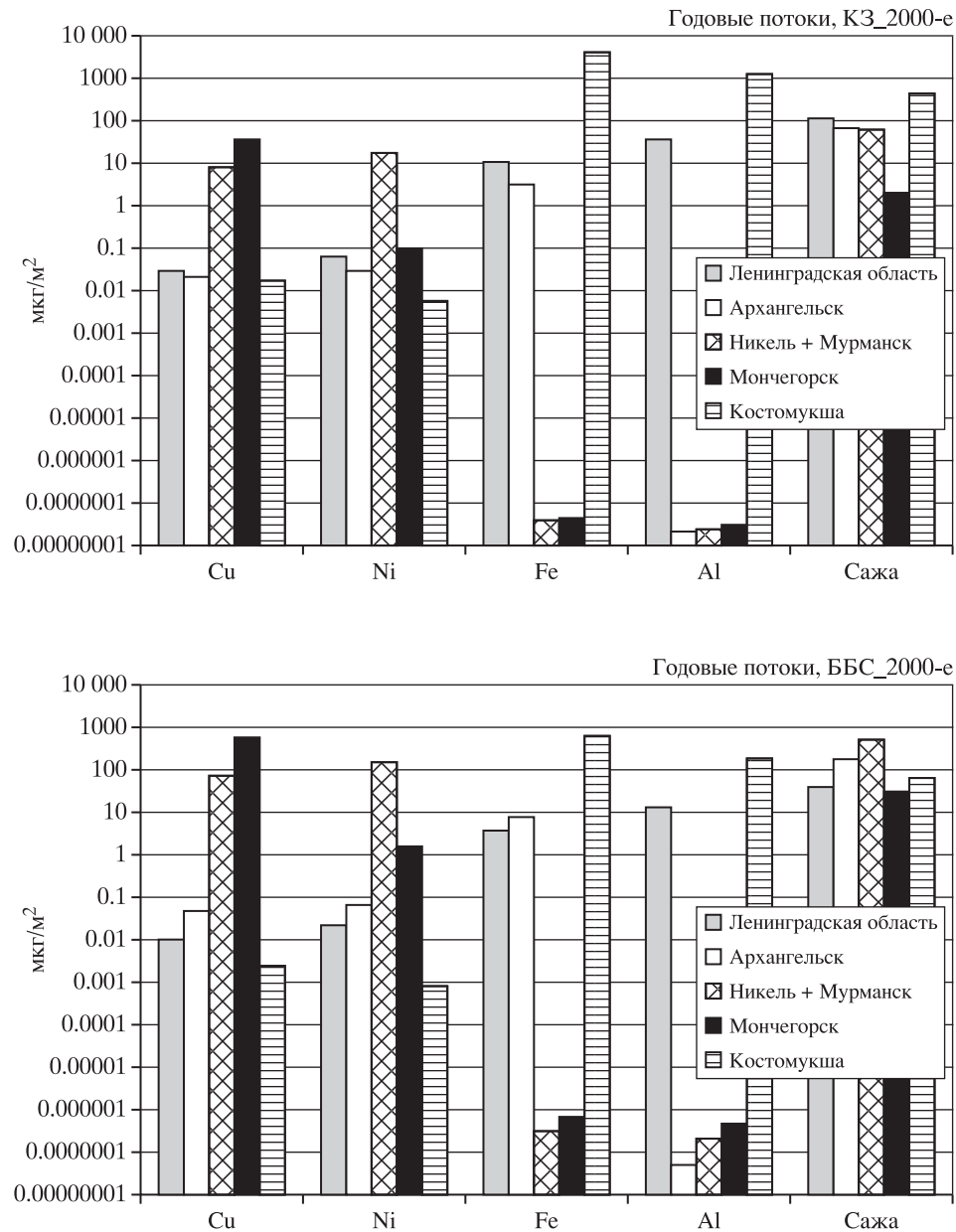


Рис. 5. Соотношение вкладов источников в формирование антропогенных годовых потоков металлов и сажи из атмосферы на поверхность вблизи КЗ (вверху) и ББС (внизу). Средние оценки для 2000-х годов.

такие же диаграммы для Cu и Al, поскольку зависимости для меди качественно аналогичны графикам для никеля, а зависимости для алюминия – графикам для железа (основные источники у этих пар элементов схожи). Сезонный ход характеристик загрязнения атмосферы и подстилающей поверхности определяется главным образом количеством и видом осадков в разные сезоны, что проявляется в величине скорости осаждения на поверхность K . В большинстве случаев холодная часть года характеризуется максимальными концентрациями загрязнений в воздухе и минимальными их выпадениями на поверхность, тогда как

в теплое время года при максимальных жидких осадках воздух становится чище, зато сильнее загрязняются наземные объекты. На ББС вариации всех характеристик в течение года качественно очень похожи. Для района КЗ все три картинки различны даже качественно, поскольку здесь, как мы уже отмечали, для железа и сажи важна близость источника “Костомукша”. Подчеркнем еще раз, что величины, приведённые на рис. 4, являются средними для 10-летия. Таким образом, сравнение с экспериментально измеренными (обычно за значительно более короткий срок) показателями должно быть очень осторожным.

Соотношение вкладов различных источников в загрязнение поверхностных объектов окружающей среды вблизи КЗ и ББС отражено на рис. 5. Годовой поток из атмосферы на поверхность – это самая общая характеристика воздействия на наземные объекты, которую можно использовать при анализе атмосферного вклада в загрязнение различных экосистем. Видно, что в районе ББС выбросы с территории Мурманской области, расположенной ближе к ней, сказываются на порядок сильнее, чем на территории КЗ. Это особенно заметно для потоков меди и никеля, которые определяются источниками Мурманской области на всем севере России [26]. В свою очередь, потоки железа и алюминия максимальны от Костомукши, и вблизи КЗ они на порядок больше, чем на ББС. Загрязнение окружающей среды сажей от рассмотренных источников почти одинаково в обоих пунктах, на ББС оно несколько меньше, чем в районе КЗ.

Поскольку наши оценки параметризованы для расчетов переноса субмикронного аэрозоля, они больше всего должны подходить для оценок переноса антропогенных тяжелых металлов, то есть меди и никеля. Эмиссии этих двух металлов, приведенные в [15], приблизительно соответствуют их промышленным выбросам как раз в составе субмикронной фракции аэрозоля. Для сажи, железа и алюминия полученные результаты надо рассматривать только как качественные, так как для них нет никакой информации о распределении по размерам аэрозольных частиц ни в выбросах открытого карьера Костомукшского ГОК (для Fe и Al), ни для антропогенной эмиссии сажи в [15]. На основании некоторых косвенных данных и частных бесед можно считать, что не менее половины общей эмитированной в атмосферу антропогенной сажи (без учета пожаров) должно приходиться на субмикронные частицы.

Сводка полученных численных средних годовых оценок (со всеми приведенными оговорками) всех рассмотренных нами характеристик загрязнения окружающей среды приведена в табл. 2. Средние концентрации примесей в осадках рассчитаны нами для двух показателей – концентрация в жидких осадках C_R и концентрация в снеговой воде C_S в период весеннего таяния. Первая вычислялась следующим образом:

$$C_R = 3(D_{R1} + D_{R4} + D_{R7} + D_{R10}) / P_{RY}, \quad (4)$$

где цифровые индексы соответствуют номеру месяца и для каждого месяца $D_R = (WP/K)D$ – поток примеси, выпадающий на поверхность с дожде-

Таблица 2. Характеристики антропогенного загрязнения окружающей среды рассматриваемыми примесями в районах Костомукшского заповедника (КЗ) и биостанции МГУ (ББС): средняя концентрация в приземном воздухе C_A , суммарный поток на поверхность за год D , концентрация в осадках C_p (средняя для жидких осадков и в снеговой воде, накопленная за период снегозалегания)

Примесь	Место	C_A , нг/м ³	D , мкг/м ² / год	C_p , мкг/л	
				снеготаяние	дождь-средняя
Cu	КЗ	0.53	46	0.15	0.053
	ББС	4.5	610	1.5	0.89
Ni	КЗ	0.24	18	0.066	0.017
	ББС	1.2	140	0.40	0.18
Fe	КЗ	33.4	4100	9.6	6.6
	ББС	5.0	590	1.6	0.76
Al	КЗ	11.0	1320	3.1	2.1
	ББС	1.7	190	0.56	0.24
Сажа	КЗ	6.8	670	1.9	0.92
	ББС	7.4	790	2.4	0.95

выми осадками; P_{RY} – количество жидких осадков за год.

В снеге примесь накапливается в течение всего периода снегозалегания, который в среднем для исследуемого района составляет 5,5 месяцев [17] (с ноября до середины апреля), поэтому концентрация примеси в снеговой воде вычислялась как отношение суммарного потока примеси на поверхность за это время к влагосодержанию снега P_S перед таянием:

$$C_S = (3D_1 + 1.5D_4 + D_{10}) / P_S. \quad (6)$$

Величина P_S для Центральной Карелии составляет около 150 мм [17, 24].

Пространственное расположение источников сильно сказывается на их влиянии на состав атмосферы и потоки на поверхность различных элементов. Видно, что из-за близости источников меди и никеля (Мурманская обл.) потоки этих ТМ на ББС приблизительно на порядок выше, чем вблизи КЗ. Наоборот, на КЗ в 5–10 раз выше потоки железа и алюминия (близость Костомукши). Более равномерное пространственное распределение атмосферных выбросов сажи определяет близкие для обоих пунктов значения показателей загрязнения по саже.

Сопоставление оценок с экспериментально измеренными величинами. Интересно сопоставить полученные модельные оценки с реально измеренными показателями загрязнения окружающей среды вблизи рассматриваемых территорий Центральной Карелии. Сводка имеющихся данных для Ni и Cu приведена в табл. 3. Видно, что вели-

Таблица 3. Сравнение полученных оценок с результатами реальных наблюдений и других оценок

Характеристика загрязнения	Место	Тяжелые металлы		Ссылки
		Ni	Cu	
Концентрация в воздухе, нг/м ³	Шпицберген [#]	0.04–0.43	0.13–0.65	[28]
	Белое море [#]	0.4–5,5	1.6–8.5	[1, 14, 18, 30]
	Арктика**	0.11–0.13	0.16–0.2	[11]
	Восточная Финляндия [#]	0,54	0,52	[37]
	КЗ	0.24	0.53	Данная работа
	ББС	1.2	4.5	
Поток на поверхность, мкг/м ² /год	Арктика**	9.5–9.9	14–15	[11]
	Восточная Финляндия [#]	60	720	[37]
	КЗ	18	46	Данная работа
	ББС	140	610	
Концентрация в снеговой воде, мкг/л	Окрестности Костомукши [#]	0.05	0.1	[16]
	КЗ	0.066	0.15	Данная работа
Средняя концентрация в жидких осадках, мкг/л	ЕТР*		1,5–9	[22]
	Сибирь		2–3	и аналогичные за 2006–2010 гг.
	КЗ		0.053	Данная работа
	ББС		0.9	

* ЕТР – европейская территория России.

** Арктика – оценки для архипелагов Земля Франца Иосифа и Северная Земля.

[#] Результаты измерений.

чины атмосферных концентраций, полученные в данной работе, попадают внутрь широкого интервала измеренных значений. Еще раз подчеркнем, что сопоставляются средние 10-летние оценки с измерениями, усредненными за короткие отрезки времени (не более месяца, как в [28]). Потоки на поверхность в более удаленных районах Арктики, оцененные по аналогичной методике [11], ниже, что естественно. Наиболее усредненные показатели – концентрации в снеговой воде – в 2007 г. (по данным [16]) перед таянием (весной) в районе Костомукши очень хорошо совпадают с нашими средними оценками. Полученные нами оценки средних концентраций в жидких осадках, естественно, ниже измеренных в более южных районах ЕТР и Сибири – по данным, аналогичным [22], за 2006–2010 гг.

Выводы. Проведен анализ закономерностей дальнего переноса воздушных масс в район Центральной Карелии для января, апреля, июля и октября за 10 лет (2000–2009 гг.) с использованием ежедневных обратных траекторий движения воздуха по данным ARL NOAA и модели HYSPLIT4.

Проанализирован атмосферный перенос антропогенных металлов и сажи от ближайших (в пределах 1000 км) источников загрязнений окружающей среды для двух ООПТ в Центральной Карелии – Костомукшского заповедника и Беломорской биостанции МГУ. Выявлены наиболее значимые регионы-источники различных антропогенных примесей (Ni, Cu, Fe, Al, сажа) для окружающей среды рассматриваемого района.

Численные оценки, полученные в данном исследовании, дают представление о средней (для 2000-х годов) антропогенной нагрузке (рассматриваемыми металлами) на атмосферу и подстилающую поверхность в изучаемом районе. В отношении сажи оценки носят лишь качественный характер, но приведенные эмиссии и соотношения вкладов регионов-источников могут быть в дальнейшем использованы для более точных количественных оценок.

Сравнение полученных оценок антропогенных никеля и меди в различных показателях загрязнения окружающей среды с имеющимися данными реальных измерений показывает неплохое соответствие результатов. Таким образом, численные оценки данной работы могут быть полезными для анализа и прогноза экологической ситуации в наземных экосистемах на труднодоступных и особо охраняемых территориях севера Европейской России. Методика исследований может приме-

няться для получения аналогичных оценок и для других районов.

Авторы признательны Лаборатории воздушных ресурсов (ARL) NOAA за предоставление возможности использовать модель HYSPLIT для расчета траекторий движения воздушных масс, положенных в основу данного исследования. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ – грант № 11-05-00300.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аэрозоли Арктики и их влияние на окружающую среду // Аэрозоли Сибири / Отв. ред. д.ф.-м.н. Куценогий К.П. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2006. 548 с.
2. Брызгин Н.Н. Характеристики осадков в Российской Арктике, влияющие на удаление загрязнений из атмосферы // Тр. ААНИИ. СПб.: Гидрометеоздат, 1998. Т. 439. С. 135–148.
3. Бызова Н.Л., Гаргер Е.К., Иванов В.Н. Экспериментальные исследования атмосферной диффузии и расчеты рассеяния примеси. Л.: Гидрометеоздат, 1991. 278 с.
4. Виноградова А.А. Меридиональные потоки массы и энергии вблизи границы Арктики // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2007. Т. 43. № 3. С. 314–326.
5. Виноградова А.А. Дальний перенос воздушных масс и атмосферных аэрозолей в район Белого моря // Система Белого моря. Т. II. М.: Научный мир, 2011.
6. Виноградова А.А., Иванова Ю.А. Антропогенное загрязнение природных сред в районе Костомукшского заповедника (Карелия) при дальнем переносе аэрозольных примесей в атмосфере // Оптика атмосферы и океана. 2011. Т. 24. № 6. С. 493–501.
7. Виноградова А.А., Максименков Л.О., Погарский Ф.А. Атмосферный перенос антропогенных тяжелых металлов с территории Кольского полуострова на поверхность Белого и Баренцева морей // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2008. Т. 44. № 6. С. 812–821.
8. Виноградова А.А., Максименков Л.О., Погарский Ф.А. Влияние промышленности Норильска и Урала на окружающую среду различных районов Сибири // Оптика атмосферы и океана. 2008. Т. 21. № 6. С. 479–485.
9. Виноградова А.А., Пономарева Т.Я. Сезонные изменения атмосферных концентраций и выпадений антропогенных примесей в Российской Арктике // Изв. АН. Физика атмосферы и океана. 2001. Т. 37. № 6. С. 761–770.
10. Виноградова А.А., Пономарева Т.Я. Источники и стоки антропогенных микроэлементов в атмосфере Арктики: тенденции изменения с 1981 по 2005 г. // Оптика атмосферы и океана. 2007. Т. 20. № 6. С. 471–480.
11. Виноградова А.А., Пономарева Т.Я. Атмосферный перенос антропогенных примесей в арктические районы России (1986–2010 гг.) // Оптика атмосферы и океана. 2012. Т. 25. № 6. С. 475–483.
12. Гальперин М., Софиев М., Гусев А., Афиногенова О. Подходы к моделированию трансграничного загрязнения атмосферы Европы тяжелыми металлами. М.: ЕМЕП/МСП-В, 1995. Отчет 7/95. 85 с.
13. Голубева Н.И., Бурцева Л.В., Гинзбург В.А. Тяжелые металлы в атмосферных осадках на побережье Баренцева моря // Метеорол. и гидрол. 2010. № 5. С. 60–70.
14. Голубева Н.И., Матишов Г.Г., Бурцева Л.В. Атмосферные потоки тяжелых металлов в Баренцево море в секторе Кольского полуострова // Фундаментальные исследования океанов и морей. М.: Наука, 2006. Книга 2. С. 465–475.
15. Ежегодник выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух городов и регионов Российской Федерации за 2007 г. СПб., 2008. 204 с.
16. Исследование химического состава атмосферных осадков Карелии. Отчет Института водных проблем Севера КарНЦ РАН. Петрозаводск, 2007. 11 с.
17. Климат Карелии. <http://www.kartravel.ru/my-karelia1.html>
18. Куценогий К.П., Шевченко В.П., Лисицын А.П. и др. Химический состав атмосферных аэрозолей в районе Белого моря // Геология морей и океанов. Тез. Докл. XVI междунар. научной школы по морской геологии (Москва, 14–18 ноября 2005 г.). М.: ГЕОС, 2005. Т. I. С. 75–76.
19. Макштан А.П., Священников П.Н. Характеристики облачности Арктического бассейна и опыт их статистического моделирования // Тр. ААНИИ. СПб.: Гидрометеоздат, 1998. Т. 439. С. 135–148.
20. Малышкин А.В., Поддубный В.А., Маркелов Ю.И., Береснев С.А. и др. Средний Урал в системе AEROSIBNET: предварительный анализ влияния региональных источников аэрозольного загрязнения атмосферы // Оптика атмосферы и океана. 2007. Т. 20. № 6. С. 497–500.
21. Нагурный А.П., Тимерев А.А., Егоров С.А. Пространственно-временная изменчивость инверсий в нижней тропосфере Арктики // ДАН. 1991. Т. 319. № 5. С. 1109–1113.
22. Обзор загрязнения природной среды в Российской Федерации за 2006 г. СПб.: Гидрометеоздат, 2007. 162 с. <http://www.meteorf.ru>
23. Суркова Г.В., Еремина И.Д., Мордкович П.А. О влиянии крупномасштабного атмосферного переноса на химический состав и количество атмосферных

- осадков в центре европейской территории России // Метеорол. и гидрол. 2010. № 4. С. 36–44.
24. Федорец Н.Г., Бахмет О.Н., Солодовников А.Н., Морозов А.К. Почвы Карелии: геохимический атлас. М.: Наука, 2008. 47 с.
 25. Шевченко В.П. Влияние аэрозолей на среду и морское осадконакопление в Арктике. М.: Наука, 2006. 226 с.
 26. Шевченко В.П., Стародымова Д.П., Кутенков С.А., Виноградова А.А. и др. Содержание тяжелых металлов в кустистых эпифитных лишайниках Карелии как индикатор атмосферного переноса загрязняющих веществ // Современные проблемы науки и образования. 2011. № 3; URL: www.science-education.ru/97-4692
 27. AMAP, 2011. The Impact of Black Carbon on Arctic Climate (2011). By: P.K. Quinn, A. Stohl, A. Arneth, T. Berntsen, J.F. Burkhardt, J. Christensen, M. Flanner, K. Kupiainen, H. Lihavainen, M. Shepherd, V. Shevchenko, H. Skov, and V. Vestreng Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), Oslo. 128 p.
 28. Berg T., Hjellbrekke A.- G., Skjelmoen J.E. Heavy metals and POPs within the ECE region // EMEP/CCC – Report 8/96. O-95038. NILU, Norway, 1996. 187 p.
 29. Draxler R.R., Rolph G.D. HYSPLIT (HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) Model access via NOAA ARL READY. 2003. (<http://www.arl.noaa.gov/ready/hysplit4.html>).
 30. Koutzenogii K.P., Shevchenko V.P., Lisitzin A.P., et al. The chemical composition of atmospheric aerosols at the Kartesh biostation (the White Sea) // Seventh Workshop on Land Ocean Interactions in the Russian Arctic, LOIRA project. Abstracts. Moscow, November 15–18, 2004. P. 65–66.
 31. Pacyna J.M., Bartonova A., Cornille P., and Maenhaut W. Modeling of long-range transport of trace elements. A case study // *Atm. Environ.* 1989. V. 23. № 1. P.107–114.
 32. Polissar A.V., Hopke P.K., Harris J.M., Bodhaine B.A., Dutton E.G. Source regions for atmospheric aerosol measured in the Western Arctic // *J. Aerosol Sci.* 1998. V. 29. Suppl. 1. P. S513–S514.
 33. Rahn K.A. Relative importances of North America and Eurasia as sources of Arctic aerosol // *Atm. Environ.* 1981. V. 15. №. 8. P. 1447–1455.
 34. Salvador P., Artinano B, Pio C., et al. Evaluation of aerosol sources at European high altitude background sites with trajectory statistical methods // *Atm. Environ.* 2010. V. 44. P. 2316–2329.
 35. Shevchenko V., Lisitzin A., Vinogradova A., Stein R. Heavy metals in aerosols over the seas of the Russian Arctic // *Sci. Total Environ.* 2003. V. 306. P. 11–25.
 36. Stohl A. Computation, accuracy and applications of trajectories – A review and bibliography // *Atm. Environ.* 1998. V. 32. № 6. P. 947–966.
 37. Metal pollution in lakes surrounding the Kostomuksha ore dressing mill in northwestern Russia // Report of Kainuu Regional Environment Centre 2 / Eds Varkonyi G., Heikkila R.aimo and Heikkila J. 2008. 45 p.
 38. Vinogradova A.A. Anthropogenic pollutants in the Russian Arctic atmosphere: sources and sinks in spring and summer // *Atm. Environ.* 2000. V. 34. № 29–30. P. 5151–5160.
 39. ZOTTO. <http://www.zottoproject.org>

Pollution of central Karelia environment under long-range atmospheric transport of anthropogenic pollutants

A.A. Vinogradova*, Yu.A. Ivanova**

*Obukhov Institute of Atmospheric Physics, RAS

**Lomonosov Moscow State Academy of Fine Chemical Technology

The long-range atmospheric transport of air masses and anthropogenic pollutants to the central part of Karelia (to Kostomuksha Nature Reserve and to the White Sea Biological Station of Moscow State University) has been analyzed for the period of 2001–2010. The arrays of everyday air transport trajectories to these places were calculated with the help of the NCEP/NCAR data for January, April, July, and October. The contribution of surrounding industrial complexes and regions (Murmansk, Arkhangelsk, Leningrad oblasts, Saint-Petersburg, and Kostomuksha) in environmental pollution at the places under investigation were calculated. The mean pollutants (Cu, Ni, Fe, Al, and soot) concentrations in air and precipitations, as well as their mean flows onto the surface were estimated for different seasons and annually.