

Антропогенное загрязнение природных сред в районе Костомукшского заповедника (Карелия) при дальнем переносе аэрозольных примесей в атмосфере

А.А. Виноградова, Ю.А. Иванова*

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

Поступила в редакцию 31.01.2011 г.

Проанализированы закономерности дальнего переноса воздушных масс и некоторых антропогенных примесей в район Костомукшского заповедника (Республика Карелия) в 2000–2009 гг. Определены основные промышленные регионы-источники (Мурманская, Архангельская и Ленинградская области, гг. Санкт-Петербург и Костомукша) загрязнения окружающей среды в районе заповедника. Оценены средние концентрации в воздухе антропогенных Cu, Ni, Pb, Fe, Al, сажи, поступающих от этих источников, а также потоки этих примесей из атмосферы на подстилающую поверхность для разных сезонов и в масштабах года. Оценены вклады карьера Костомукшского горно-обогатительного комбината (для железа и алюминия) и трансграничного атмосферного переноса со стороны Финляндии (для свинца, никеля и меди) в загрязнение окружающей среды заповедника.

Ключевые слова: атмосфера, антропогенное загрязнение, дальний перенос, заповедник, окружающая среда; *atmosphere, anthropogenic pollution, long-range transport, reserves, environment.*

Введение

Вопросам прогнозирования и контроля качества природной среды в последние годы уделяется много внимания в связи с быстро меняющимися климатическими условиями, а также с возникновением и ростом новых промышленных центров и комплексов на ранее неосвоенных территориях. Новый класс задач на стыке экологии, климатологии и экономики предполагает как развитие новых подходов (например, анализ рисков и уязвимостей территорий [1]), так и совместное применение ранее развитых методов (сочетание моделирования и мониторинга [2]) на самом современном уровне. В наше время даже в самых удаленных районах Северной Евразии невозможно избежать антропогенного воздействия на окружающую среду при дальнем переносе загрязнений воздушными массами или речными водами.

В настоящей статье развитый ранее подход к анализу антропогенного воздействия (через атмосферу) на окружающую среду удаленных и труднодоступных районов [3, 4] используется для изучения нагрузки на природные среды одного из заповедников в Карелии. При этом оказалось возможным не только оценить уровень загрязнения и проанализировать роль разных удаленных источников, но и дать грубую оценку атмосферной эмиссии такого малоизученного и в то же время широко распро-

страненного антропогенного источника аэрозольных примесей, как открытый карьер предприятия по добыче и переработке руды. На территории России таких источников аэрозольных примесей множество. Используемая методика может быть применена в любом регионе, где проводятся регулярные наблюдения за составом воздуха и осадков, что часто входит в комплекс исследований окружающей среды заповедников.

Природный заповедник «Костомукшский» (далее – Заповедник), созданный в 1983 г. для сохранения и изучения типичных северотаежных природных ландшафтов, расположен на границе России и Финляндии [5] приблизительно в ее середине. До начала 1980-х гг. это был типичный фоновый район, удаленный не только от крупных городов и транспортных сетей, но и вообще от стационарных поселков. Только местное население занималось здесь традиционными промыслами (охота, рыбная ловля, сбор грибов и ягод и т.п.). В 1982 г. началась разработка крупнейшего на северо-западе России Костомукшского месторождения железистых кварцитов, что привело к быстрому образованию и росту г. Костомукша (в 30 км от Заповедника), развитию коммуникаций и, соответственно, повышению антропогенной нагрузки на ближайшую территорию. Горно-обогатительный комбинат (ГОК) ОАО «Карельский окатыш» перерабатывает в год около 24 млн т железных руд и выпускает 8,84 млн т обогащенных железных окатышей. Его продукция частично поставляется в Финляндию, а также является основой для работы

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

металлургических предприятий г. Череповец. Суммарные выбросы загрязняющих веществ в атмосферу от стационарных источников и автотранспорта г. Костомукша составляют 54,17 тыс. т/год (по данным [6] за 2007 г.). Выбросы в атмосферу и поток загрязняющих веществ в наземные экосистемы от ближайшего к Заповеднику источника загрязнений — района г. Костомукша — характеризуются многокомпонентным химическим составом, включающим, в частности, диоксид серы (30,26 тыс. т/год), оксид углерода (1,08 тыс. т/год), оксиды азота (1,35 тыс. т/год), твердые вещества (6,87 тыс. т/год). Влияние Костомукшского ГОК на окружающую природу Карелии изучалось в ходе работ различных ведомств, результаты которых обобщены в [7].

Однако экологическую обстановку в районах северо-запада России в целом определяют более мощные производства Ленинградской области (суммарные годовые выбросы загрязняющих веществ от стационарных источников и автотранспорта составляют 45,58 тыс. т), Санкт-Петербурга (569,779 тыс. т), Архангельской (96,9 тыс. т) и Мурманской (Мурманск — 70,5 тыс. т, Мончегорск — 50,65 тыс. т, пгт. Никель — 65,3 тыс. т, Заполярный — 49,72 тыс. т) областей [6]. Также заметный вклад вносит трансграничный атмосферный перенос загрязнений от стран Западной Европы [8]. Оценка влияния этих источников на состав воздуха и осадков, их вкладов в загрязнение наземных природных объектов Костомукшского заповедника — вот цель данной работы.

Изучение переноса антропогенных загрязнений в район Заповедника основано на так называемом траекторном подходе [3, 4]. Сначала проводится статистический анализ пространственного распределения траекторий переноса воздушных масс, проходящих к Заповеднику в течение 10 лет, анализируются возможности поступления с ними загрязнений от ряда крупных промышленных центров и регионов, расположенных на северо-западе России. Затем оцениваются вклады этих источников в загрязнение атмосферы Заповедника, средние концентрации ряда антропогенных составляющих в воздухе и в осадках, а также их средние потоки из атмосферы на подстилающую поверхность на территории Заповедника. В заключение оценивается вклад промышленности Финляндии (как ближайшей европейской страны) в загрязнение природы Заповедника в результате трансграничного атмосферного переноса.

Методы и подходы

Перенос воздуха в район Костомукшского заповедника изучался по траекториям движения воздушных масс к пункту наблюдений (условной точке на территории Заповедника с координатами 64,57° с.ш., 30,67° в.д. на высоте 100 м от поверхности земли). Расчет 2-суточных обратных трехмерных траекторий переноса воздуха (старт в 00 ч GMT, интервал расчетов 6 ч) осуществлялся для каждого дня на протяжении 10 лет (с 2000 по

2009 г.) с помощью модели HISPLYT 4 и данных реанализа полей метеорологических характеристик NOAA (NCEP/NCAR Reanalysis Data Files) [9]. Анализируются средние (за 10 лет) пространственные распределения траекторий для каждого месяца, для каждого сезона (по 3 мес) и для года в целом. Межгодовая изменчивость рассматривалась по среднесезонным и среднегодовым распределениям.

Методика оценок переноса аэрозольных примесей в атмосфере, их концентраций в воздухе и потоков на подстилающую поверхность была подробно описана в [3, 4], поэтому кратко остановимся на основных формулах, допущениях и значениях параметров, принятых для данного исследования.

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

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

где $Q_i(X)$ — мощность эмиссии примеси в единицу времени; $\alpha = 0,2$ — доля примеси, оседающая на поверхность вблизи источника [10, 11]. Функция $Z_{ij}(X)$ характеризует все атмосферные процессы, влияющие на примесь по пути движения от источника i пункту j , и зависит от вероятности и длительности движения воздуха между этими пунктами, а также от условий вертикального перемешивания и скорости выведения примеси из атмосферы во время переноса:

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

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; H_j — высота слоя перемешивания (в нашем случае — 250 м зимой и весной, 500 м летом и осенью); L_{ij} — расстояние между источником i и пунктом j , м; $K = k_d + WP$ — скорость осаждения примеси на подстилающую поверхность, см/с, определяющаяся сухим (k_d) осаждением и осаждением осадками (W — эффективность захвата примеси осадками, P — количество осадков в единицу времени); t_n — длительность $6n$ часов, с; b — параметр размывания воздушного потока в горизонтальном направлении, перпендикулярном траектории, который, по оценкам [11], при дальнем переносе примеси приблизительно равен 0,1–0,2.

Значения K не различались нами для разных примесей, поскольку предполагалось, что антропогенные примеси наиболее эффективно вовлекаются в дальний перенос на аэрозольных частицах близких (субмикронных) размеров, для которых 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 литера-

турные данные о скоростях сухого осаждения субмикронных частиц над различными поверхностями [10, 11], а также климатические характеристики (количество и качество осадков, период снеготаяния, температура воздуха и т.д.) для рассматриваемой территории [12, 13].

Для каждого сезона 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 следующей формуле:

$$D = CTk. \quad (3)$$

Состав и мощность выбросов в атмосферу пяти ближайших к Заповеднику промышленных регионов-источников представлены в табл. 1 (по данным [6] для 2007 г.).

Таблица 1
Состав и мощность выбросов регионов-источников в атмосферу (по данным [6]), т/год

Вещество	Лен. обл.+С-Пб.	Архангельск	Никель+Мурманск	Мончегорск	Костомукша
Cu	0,42	0,51	170	619	0,003
Ni	0,90	0,69	351	1,71	0,001
Pb	0,17	0,03	1,23	6,92	0,001
Fe, оксид	187	100	—	—	2,12
Al, оксид	951	—	—	—	—
Сажа	1515	1672	1234	35,2	73,6

Здесь Мончегорск рассматривается отдельно, а источник «Никель + Мурманск» объединяет в себе все остальные источники Мурманской области. Рассматриваются те составляющие выбрасываемого аэрозоля, которым соответствуют максимальные эмиссии этих регионов. Прежде всего, это никель и медь, источники которых, в основном, расположены на Кольском полуострове и в сумме составляют самый мощный антропогенный источник этих металлов в Арктике. Свинец — это очень мобильная и опасная для окружающей среды и человека антропогенная примесь, которую всегда включают в подобные исследования (например, [8, 14]). Как уже отмечалось, специфика близко расположенного г. Костомукши — в выбросах большого количества оксида железа. Ленинградская область является единственным в этом списке источником оксида алюминия. Две последние составляющие и сажа, выбрасываемая всеми регионами-источниками, — наиболее «неудобные» примеси, так как по ним нет информации о распределении по размерам аэрозольных частиц, на которых они сорбированы в атмосфере, что затрудняет количественные оценки дальнего переноса.

Распределение приходящих воздушных масс

Средние пространственные распределения (по четырем основным сторонам горизонта) траекто-

рий, по которым воздух движется к пункту наблюдений, показаны на рис. 1.

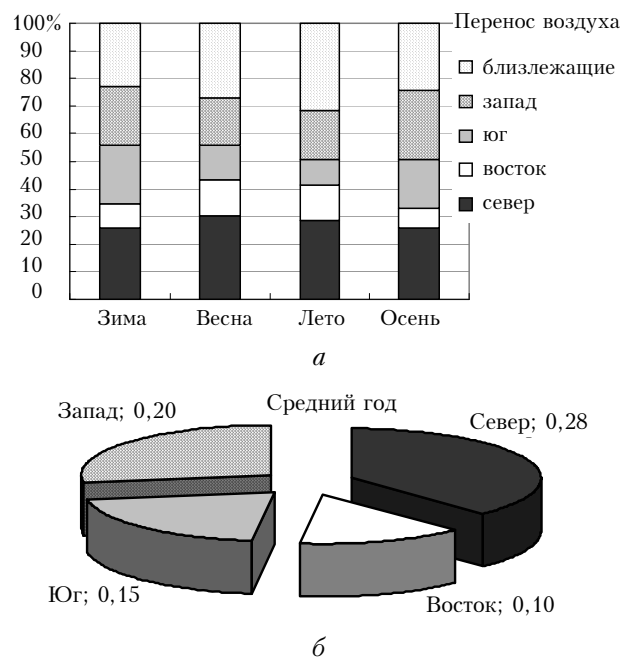


Рис. 1. Частота поступления воздушных масс с разных направлений (по четырем основным сторонам горизонта) в район заповедника: а — сезонные вариации; б — в среднем за год. Ближлежащие траектории образуются в условиях блокировки дальнего переноса

Подчеркнем, что это не направления ветра, а преимущественные направления, где формируются воздушные массы (в том числе и их состав), поступающие затем к Заповеднику. Видно, что распределения схожи для половин года: осень—зима и весна—лето. Осенью и зимой преобладает перенос с севера и запада. Весной и летом ослабевает перенос с запада и юга, но усиливается с востока. Ввиду небольшой длительности изучаемых траекторий, часть из них целиком располагалась вблизи пункта наблюдений (дальний перенос блокирован). В этих случаях воздух двигался вблизи центров циклонических или антициклонических образований, достаточно часто перемещающихся с запада на восток над изучаемой территорией. По нашим данным, в среднем за год такая ситуация в районе Заповедника наблюдается в 27% случаев (летом до 33%), а остальные ситуации распределены по четырем основным направлениям в соотношении, показанном на рис. 1, б. Корреляционный анализ внутригодовых вариаций среднемесячных частот переносов показал, что северные воздушные массы конкурируют с южными (коэффициент корреляции $R = -0,70$), а западные — с восточными ($R = -0,87$). Блокировка дальнего переноса чаще соответствует уменьшению частоты переноса воздуха с южных ($R = -0,73$) и западных ($R = -0,60$) направлений.

Сложную межгодовую изменчивость в процессах переноса воздушных масс к Заповеднику с разных направлений демонстрирует рис. 2.

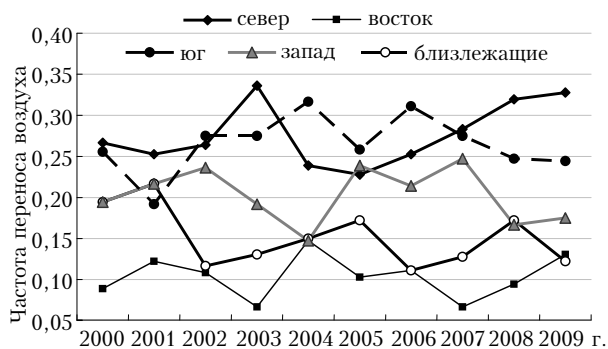


Рис. 2. Межгодовая изменчивость частоты переноса воздуха к заповеднику с разных направлений (по среднегодовым распределениям)

По таким среднегодовым распределениям выявить какие-либо закономерности в представленных рядах невозможно. Однако анализ аналогичных зависимостей отдельно для каждого из четырех сезонов позволяет качественно обнаружить ряд тенденций многолетних изменений в процессах переноса воздуха к заповеднику за рассматриваемые 10 лет (табл. 2).

Таблица 2

Корреляции (с коэффициентами $R > 0,6$) и тренды в межгодовой изменчивости направлений переноса воздуха в район заповедника (по 10-летним рядам)

Сезон	Корреляция		Линейный тренд (качественно)		
	Пара направлений	Коэффициент корреляции, R	Направление	Знак	Коэффициент достоверности
Зима	нет		запад	-	0,39
Весна	восток—запад	-0,78	юг	-	0,32
Лето	север—восток	-0,68	юг	-	0,56
Осень	нет		север	+	0,39
				нет	

Наиболее четкая конкуренция между направлениями переноса воздуха наблюдалась весной (восток—запад) и летом (север—восток). Величины трендов в табл. 2 не приведены из-за небольшой длительности рядов и невысоких коэффициентов достоверности. Зимой увеличивалась частота поступления воздуха с северных направлений, а весной — с южных. Летом уменьшение частоты переноса воздуха с юга сопровождалось возрастанием частоты поступления северных воздушных масс, при этом конкуренция между этими направлениями переноса при изменениях от года к году слаба (коэффициент корреляции всего $-0,41$).

Оценки антропогенных концентраций примесей в воздухе и потоков на подстилающую поверхность

Оценки примесей на территории Заповедника основаны на дальнейшем более детальном анализе

траекторий движения воздушных масс, расчетах вероятностей A_{ij} движения воздуха от источников в район Заповедника и эффективностей переноса загрязнений Z_{ij} по формуле (2). Результаты таких вычислений показаны на рис. 3.

Видно, что учет различий в расстояниях и в условиях осаднения примесей при их движении от разных источников заметно сказывается на соотношениях Z_{ij} (рис. 3, б) по сравнению с распределением просто вероятностей переноса воздуха от источников (рис. 3, а). Подчеркнем, что соотношения Z_{ij} в точности соответствовали бы соотношениям средних сезонных вкладов источников в загрязнение атмосферы в районе заповедника, если бы мощности выбросов всех источников были одинаковыми. Как видно, в этом случае максимальное загрязнение было бы от района г. Костомукши, а минимальное — от Архангельской области.

Следующий шаг в наших расчетах — оценка вкладов источников по формуле (1) — учитывает различия мощностей и составов выбросов источников в соответствии с табл. 1. Вклады разных источников в среднегодовые атмосферные концентрации рассматриваемых примесей приблизительно пропорциональны мощностям выбросов источников, только доля Костомукши выше из-за близости его расположения к заповеднику. В результате никель и медь, в основном, поступают в район заповедника с Кольского полуострова, железо — от г. Костомукша и Ленинградской области, алюминий — от Ленинградской области, сажа — от Ленинградской и Архангельской областей и Костомукши.

Сезонный ход концентрации примеси в воздухе и ее потока на поверхность формируется в результате сезонных различий в процессах циркуляции атмосферы (вероятности переноса A_{ij} — рис. 3, а) и в скоростях осаднения примеси на поверхность, которые реально определяются качеством подстилающей поверхности, а также количеством и агрегатным состоянием осадков. Атмосферные концентрации антропогенных примесей в районе Заповедника, как правило, максимальны в холодное время года (зима, весна), когда осаднение на поверхность менее интенсивно, и минимальны летом при большом количестве осадков в виде дождя. Максимальные сезонные различия антропогенной части концентрации примеси в воздухе могут достигать 10 раз и более. Сезонные вариации потока антропогенной части примеси из атмосферы на поверхность имеют меньшую относительную амплитуду (от 1,5 до 5 раз), а положение максимумов и минимумов еще сильнее зависит от сочетания эффективностей переноса и выведения примеси. В результате возможны разные виды сезонного хода потока на поверхность для различных примесей, но наиболее распространен сезонный ход с максимумом в теплое время года и минимумом зимой.

Полученные нами оценки среднегодовых антропогенных частей концентраций примесей в воздухе и их суммарных годовых потоков на поверхность в районе Заповедника приведены в табл. 3.

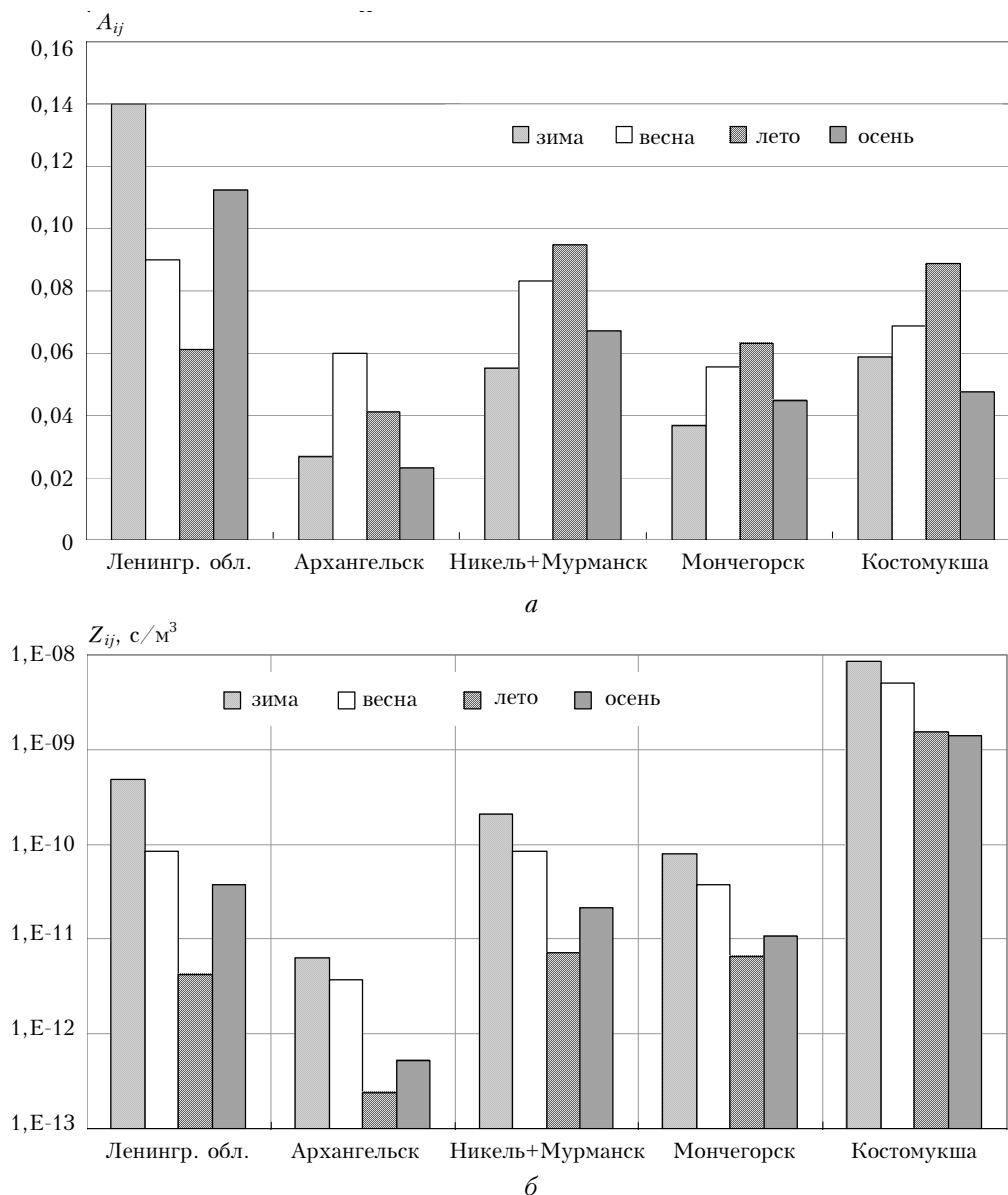


Рис. 3. Характеристики атмосферного переноса от источников к Заповеднику: *а* – вероятности переноса воздуха A_{ij} ; *б* – потенциальная функция Z_{ij} эффективности переноса примеси

Таблица 3
Среднегодовые концентрации и суммарные потоки на поверхность шести примесей, поступающих с воздушными массами от рассматриваемых источников

Вещество	Концентрация, $\text{нг}/\text{м}^3$	Поток на поверхность, $\text{мг}/\text{м}^2/\text{год}$
Cu	0,93	0,089
Ni	0,76	0,064
Pb	0,01	0,001
Al	2,08	0,134
	17,6*	2,1*
Fe	0,79	0,062
	56*	7,1*
Сажа	17,23	1,680

* Значения для Fe и Al с учетом эмиссии карьера ГОК Костомукши.

Еще раз подчеркнем, что к абсолютным значениям для сажи надо относиться с большой осторожностью. По информации, полученной от специалистов в устных беседах, более достоверные значения могут оказаться вдвое меньше, так как субмикронная часть сажи в выбросах промышленных предприятий (а именно на субмикронные частицы аэрозоля настроена вся наша схема расчетов) может составлять до половины массы.

Сравнение полученных результатов с данными наблюдений

Сравнение полученных нами средних (за 10 лет) концентраций антропогенных примесей в воздухе с результатами конкретных измерений (как правило, ограниченных во времени конкретной экспедицией)

весьма затруднительно. К сожалению, нигде в России до сих пор не проводятся круглогодичные наблюдения за элементным составом аэрозоля.

Табл. 4 позволяет сопоставить наши оценки с данными финского отчета [12], содержащего результаты измерений состава воздуха и осадков в течение 10 мес (март–декабрь) 2007 г. на территории Финляндии, примыкающей к границе с Россией, вблизи Заповедника.

Таблица 4

Сравнение полученных оценок (без учета эмиссии ГОК) и данных измерений [12] для средних концентраций примесей в воздухе с мая по декабрь, $\text{нг}/\text{м}^3$

Ссылка	Ni	Cu	Pb	Fe	Al
Данная статья	0,45	0,57	0,01	0,60	2,23
Отчет [12]	0,54	0,52	1,58	52,00	54,30

Видно, что соответствие измеренных и рассчитанных атмосферных концентраций для Ni и Cu очень неплохое. Соответствие наших оценок и результатов измерений средних месячных потоков на поверхность для никеля также хорошее (рис. 4).

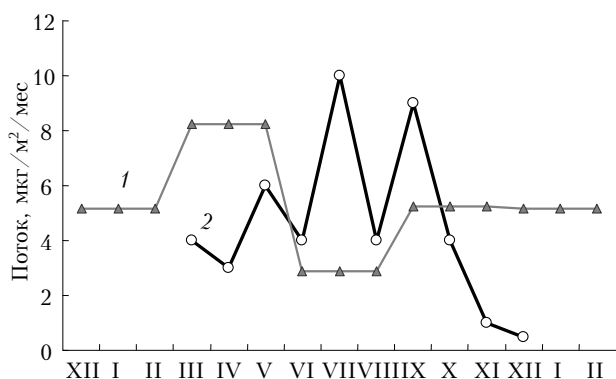


Рис. 4. Значения среднемесячного потока никеля на поверхность – оценки данной работы (средние за 10 лет) (1) и экспериментальные данные [12] для 2007 г. (2)

По-видимому, можно утверждать, что никель и медь в районе Заповедника имеют, в значительной степени, антропогенную природу, и их источниками являются промышленные предприятия Мурманской области, расположенные на Кольском полуострове. Заметим, что измеренные в [12] потоки меди на подстилающую поверхность оказались на порядок выше, чем для никеля, что трудно объяснить при практически равных концентрациях этих элементов в воздухе (табл. 4). Скорости осаждения этих элементов могут отличаться в 2–3 раза [10, 11], но не в 10. Кроме того, по данным [13] содержания Ni и Cu близки как в почвах, так и в мхах изучаемого района. По-видимому, на результатах [12] для потоков меди сказалась какая-то аналитическая или операционная ошибка.

Как видно из табл. 4, полученные нами оценки для Pb, Fe и Al очень занижены по сравнению с измеренными величинами. Ранее в [15] по аналогичной методике нами также были получены очень низкие оценки антропогенного свинца в атмосфере

по сравнению с результатами измерений над северо-западными районами России. По нашему мнению, это объясняется значительным глобальным загрязнением свинцом нижней тропосферы над всей Европой, включая и ее самые северные территории. Поле загрязнения атмосферы этой примесью формируется в результате дальнего переноса и перемешивания выбросов свинца в атмосферу всеми странами Европы [8], поскольку свинец сорбируется на самых мелких аэрозольных частицах, обладающих большим временем жизни в воздухе. По этой причине оценки с учетом лишь небольшого ограниченного количества источников антропогенного свинца дают сильно заниженные результаты. В этом отношении намного надежнее оценки, выполненные в рамках программы ЕМЕП, например в [8, 14], учитывающие выбросы всех европейских источников этого элемента, зарегистрированные в результате государственных инвентаризаций и экспертных оценок.

Оценка влияния карьера Костомукши

Причина сильных расхождений наших оценок с измеренными показателями для железа и алюминия (см. табл. 4), являющихся типичными составляющими терригенного аэрозоля, возможно, связана со спецификой близкого к Заповеднику Костомукшского горно-обогатительного комбината. В карьере этого предприятия ведется добыча руды открытым способом, при этом в атмосферу круглогодично выбрасывается пыль природного происхождения. В результате даже зимой вблизи Заповедника есть антропогенно-обусловленный источник терригенного аэрозоля (карьер). Попытаемся оценить его вклад в потоки Fe и Al из атмосферы на поверхность в районе Заповедника, предполагая, что другие аналогичные источники этих элементов, расположенные столь же близко, отсутствуют (во всяком случае, данных о них мы не обнаружили).

Предположим, что зимой измеренные потоки (около 300 и 100 $\text{мкг}/\text{м}^2/\text{мес}$ для Fe и Al соответственно) целиком определяются только карьером (КА) и той антропогенной (А) составляющей, которую мы учитывали в своих оценках по данным о выбросах из [6] (от самого ГОК и города, а также от остальных источников).

Предположим также, что сезонные изменения потоков Fe и Al от карьера в районе Заповедника пропорциональны рассчитанным ранее потокам антропогенной примеси, поступающей от Костомукши. Тогда можно оценить вклад чисто терригенной (Т) составляющей потоков Fe и Al на поверхность в районе Заповедника как превышение (рис. 5) измеренных потоков над оцененными вкладами КА и А. В результате отношение трех составляющих годового потока на поверхность Т : КА : А для Fe будет 26 : 73 : 1, а для Al – 53 : 42 : 5. Таким образом, для железа вклад от карьера преобладает (около 3/4 суммарного потока), а для алюминия составляет почти половину измеряемого потока, при этом вклад собственно антропогенной состав-

ляющей от рассмотренных нами пяти источников очень мал для обеих примесей.

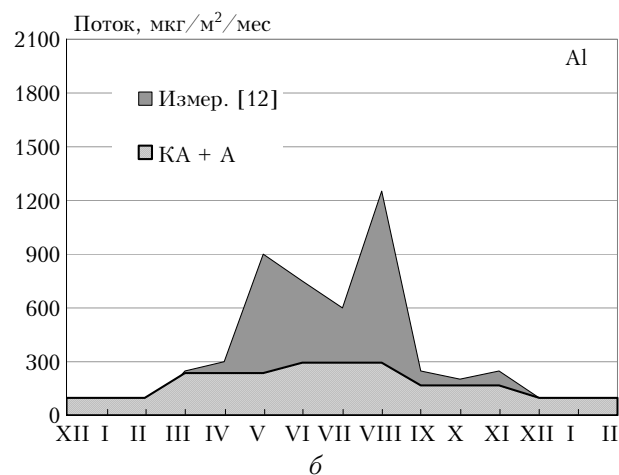
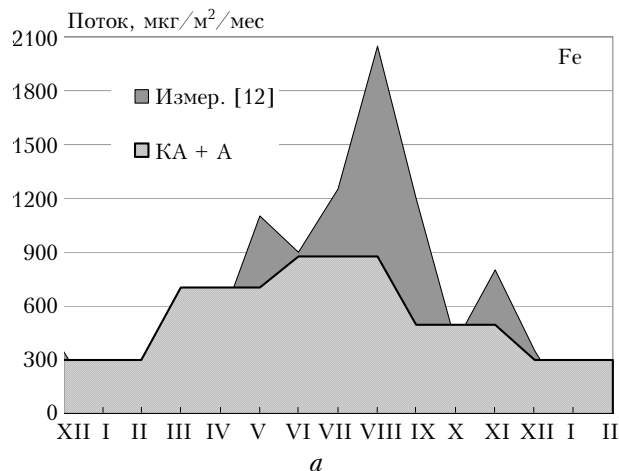


Рис. 5. Потоки железа (а) и алюминия (б) из атмосферы на подстилающую поверхность: данные измерений [12] и оценки суммарного вклада карьера и антропогенных источников (КА + А)

По нашим оценкам, вклад чисто терригенной составляющей (при отсутствии снежного покрова) приблизительно одинаков для этих элементов — около $2,5 \text{ кг/км}^2/\text{год}$ как для Fe, так и для Al, что не противоречит их приблизительно одинаковым количествам в почвах окружающих территорий [13].

Из соотношений для зимы, когда вклад терригенного аэрозоля пренебрежимо мал, можно грубо оценить годовые эмиссии в атмосферу железа и алюминия только от карьера, которые оказываются приблизительно 500 и 140 т/год соответственно. Приведенные оценки, конечно, не обладают высокой точностью, поскольку они основаны на сопоставлении рассчитанных средних антропогенных потоков Fe и Al на поверхность с величинами, измеренными в течение 10 мес конкретного 2007 г. Однако это первые оценки эмиссии непосредственно открытого карьера рудодобычи, которые демонстрируют и расширяют возможности предложенной методики изучения процессов антропогенного воздействия через атмосферу на наземные экосистемы.

Оценка трансграничного переноса со стороны Финляндии

Преобладание западного переноса воздуха над севером Евразии приводит к заметному загрязнению европейской территории России в результате переноса и осаждения атмосферных примесей, выбрасываемых другими странами Европы. В [8] оценены потоки антропогенного свинца «страна на страну», т.е. поток свинца на территорию одной страны, создаваемый выбросами другой, для всех стран Европы в 2005 г. Используя эти данные, мы попытались оценить вклад трансграничных потоков со стороны промышленности ближайшей Финляндии в потоки Pb, Ni и Cu на поверхность на территории Заповедника.

Почти меридиональное направление границы России и Финляндии и приграничное положение Заповедника позволяют выполнить грубые оценки этих потоков при следующих допущениях. Поскольку граница России с Финляндией невелика (длина $L_0 \approx 1340 \text{ км}$), а площадь Финляндии значительно меньше площади европейской части России (ЕТР), можно предположить, что вся примесь D_0 , переносимая воздушными массами от Финляндии на ЕТР, проходит только через эту границу. (Тем самым мы пренебрегаем потоками, идущими в обход, через границы с Норвегией с севера и с прибалтийскими и другими странами с юга.) Кроме того, будем считать, что поток примеси через границу в районе Заповедника приблизительно равен среднему потоку на этой границе. Это предположение соответствует равномерному распределению трансграничного потока вдоль границы или (с учетом приблизительно центрального положения Заповедника) его монотонному изменению с севера на юг. Тогда оценим средний трансграничный годовой поток D_{tr} свинца на единицу площади Заповедника следующим образом:

$$D_{tr} = D_0 K / (L_0 v H), \quad (4)$$

где v — средняя зональная составляющая скорости ветра в районе Заповедника.

По данным [8], поток свинца D_0 со стороны Финляндии на всю ЕТР составляет около 5,5 т/год при эмиссии свинца с территории Финляндии 37,5 т/год. К сожалению, в [8] нет данных о влиянии через атмосферу «страна на страну» для Ni и Cu, поэтому для оценки трансграничных потоков этих металлов мы предполагали, что доля (от эмиссии) потоков со стороны Финляндии на ЕТР для них такая же, как для Pb. Полученные по формуле (4) грубые оценки антропогенных трансграничных потоков Pb, Ni и Cu представлены в табл. 5.

Видно, что Финляндия вносит заметные вклады в потоки никеля и меди в районе Заповедника, вполне сравнимые с потоками от рассмотренных нами российских источников. Для свинца даже вклад одной Финляндии заметно превышает наши оценки от нескольких российских источников.

Таблица 5

Сравнение трансграничного потока D_{tr} со стороны Финляндии с оценками потока D от пяти источников, полученными в данной работе, для тяжелых металлов Pb, Ni, Cu

Металл	Исходные данные		Потоки на поверхность, кг/км ² /год	
	Эмиссия Финляндии Q , т/год [8]	Поток на ЕТР P_0 , т/год	Трансграничный, D_{tr}	От пяти источников, D
Pb	37,5	5,5 [8]	0,042	0,001
Ni	33,2	4,9	0,038	0,064
Cu	18,7	2,7	0,021	0,089

Заключение

Анализ закономерностей дальнего переноса воздушных масс и некоторых антропогенных примесей в район Костомукшского заповедника показал, что воздушные массы, поступающие в район Заповедника, чаще всего формируются над северными (28%) и западными (20%) территориями. В зимнее время доля южных воздушных масс достигает также 20%. Межгодовая изменчивость среднегодовых пространственных распределений велика и, в пределах 10-летия, нерегулярна. Ряд закономерностей выявлен для отдельных сезонов.

Максимальные сезонные различия антропогенной части концентрации примеси в воздухе достигают 10 раз и более при максимуме концентрации в холодное время года. Сезонные вариации потока антропогенной части примеси из атмосферы на поверхность имеют меньшую относительную амплитуду (от 1,5 до 5 раз) с минимумом зимой.

В целом, происхождение рассмотренных примесей в воздухе в районе Заповедника следующее. Никель и медь имеют в значительной степени антропогенную природу, и их источниками являются промышленные предприятия Мурманской области, расположенные на Кольском полуострове. Загрязнение свинцом не объясняется рассмотренными пятью российскими источниками, а связано со значительным глобальным загрязнением свинцом нижней тропосферы над всей Европой вплоть до ее самых северных территорий. Содержание железа и алюминия определяется в основном вкладами карьера Костомукшского ГОК (около 3/4 и 1/2 в целом за год соответственно) и природного терригенного аэрозоля, поступающего в теплое время года.

Впервые оценены атмосферные эмиссии железа и алюминия от открытого карьера Костомукшского ГОК, которые составляют приблизительно 500 т/год Fe и 140 т/год Al.

Выполнены грубые оценки трансграничного атмосферного переноса Pb, Ni и Cu только со стороны ближайшей Финляндии. В районе Заповедника вклад трансграничного переноса в поток из атмосферы на поверхность для никеля и меди вполне сравним, а для свинца заметно превышает соответствующий поток от рассмотренных российских источников.

Авторы признательны Лаборатории воздушных ресурсов (ARL) NOAA за предоставление возможности свободно использовать модель HYSPLIT для

расчета траекторий движения воздушных масс, положенных в основу данного исследования.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ – грант № 11-05-00300.

1. Пененко В.В. О концепции природоохранного прогнозирования // Оптика атмосф. и океана. 2010. Т. 23, № 6. С. 432–438.
2. Кузнецова И.Н., Зарипов Р.Б., Коновалов И.Б., Звягинцев А.М., Семутникова Е.Г., Артамонова А.А. Вычислительный комплекс «модель атмосферы – химическая транспортная модель» как модуль системы оценки качества воздуха // Оптика атмосф. и океана. 2010. Т. 23, № 6. С. 485–492.
3. Виноградова А.А., Пономарева Т.Я. Сезонные изменения атмосферных концентраций и выпадений антропогенных примесей в Российской Арктике // Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана. 2001. Т. 37, № 6. С. 761–770.
4. Виноградова А.А., Пономарева Т.Я. Источники и стоки антропогенных микроэлементов в атмосфере Арктики: тенденции изменения с 1981 по 2005 г. // Оптика атмосф. и океана. 2007. Т. 20, № 6. С. 471–480.
5. Белоусова Н.А., Данилов П.И., Зимин В.Б., Коршунов Г.Т., Кузнецов О.Л. Костомукшский заповедник // Заповедники СССР. Заповедники европейской части РСФСР. I. М.: Мысль, 1988. С. 90–100.
6. Ежегодник выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух городов и регионов Российской Федерации за 2007 год. СПб., 2008. 204 с.
7. Паителеева Я.Г. Геохимические изменения окружающей среды в зоне влияния горнопромышленного комплекса ОАО «Карельский окашш» (г. Костомукша, Республика Карелия): Автореф. дис.... канд. геол.-мин. наук. СПб., 2009. 20 с.
8. Plyin I., Rozovskaya O., Travnikov O., Aas W. Heavy metals: transboundary pollution of the environment // EMEP Status Report 2/2007. June 2007. 85 p.
9. 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>).
10. Pacyna J.M., Bartonova A., Cornille P., Maenhaut W. Modeling of long-range transport of trace elements. A case study // Atmos. Environ. 1989. V. 23, N 1. P. 107–114.
11. Бызова Н.Л., Гаргер Е.К., Иванов В.Н. Экспериментальные исследования атмосферной диффузии и расчеты рассеяния примеси. Л.: Гидрометеоздат, 1991. 278 с.
12. Varkonyi Gergely, Heikkila Raimo, Heikkila Jari (eds.). Metal pollution in lakes surrounding the Kostomuksha ore dressing mill in northwestern Russia. Report of Kainuu Regional Environment Centre 2/ 2008. 45 p.

13. Федорец Н.Г., Бахмет О.Н., Солодовников А.Н., Морозов А.К. Почвы Карелии: Геохимический атлас. М.: Наука, 2008. 47 с.
14. *Persistent Toxic Substances, Food Security and Indigenous Peoples of the Russian North. Final Report.* Oslo, Norway: AMAP, 2004. 192 p.
15. 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. Физ. атмосф. и океана. 2008. Т. 44, № 6. С. 812–821.

A.A. Vinogradova, Yu.A. Ivanova. Anthropogenic pollution of Kostomuksha reserve (Karelia) environment under long-range atmospheric transport of aerosols.

The long-range air mass transport to the region of Kostomuksha Reserve (Karelia) was analyzed for the period of 2000–2009. Air transport of anthropogenic aerosol pollution was studied. For the Reserve environment, the industrial regions of grate importance (the Murmanskaya, Arkhangelskaya, Leningradskaya areas, St.-Petersburg, and Kostomuksha) were selected. The average air concentrations and fluxes onto the surface of anthropogenic Cu, Ni, Pb, Fe, Al, and soot from the selected sources were estimated for different seasons, as well as on the annual scale. The Kostomuksha open-cast mine atmospheric emission of Fe and Al and its input to the Reserve environment were estimated. Moreover, the transboundary transport of Pb, Ni, and Cu from Finland was also assessed.