

А.А. Виноградова<sup>1</sup>, Т.Я. Пономарева<sup>2</sup>

## Источники и стоки антропогенных микроэлементов в атмосфере Арктики: тенденции изменения с 1981 по 2005 г.

<sup>1</sup>Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН,  
<sup>2</sup>Гидрометцентр РФ, г. Москва

Поступила в редакцию 25.01.2007 г.

Проведен анализ многолетних данных о переносе воздушных масс к трем пунктам в Российской Арктике и от них. Оценены средние атмосферные концентрации и потоки на подстилающую поверхность антропогенных микроэлементов в рассматриваемых районах Арктики для двух десятилетий (1986–1995 и 1996–2005). Выявлены тенденции изменения уровня загрязнения воздуха и интенсивности осаждения примесей в Российской Арктике, обусловленные долговременными изменениями в процессах циркуляции атмосферы в разные сезоны.

На рубеже XX и XXI вв. изменения, произошедшие в процессах загрязнения и очищения арктического воздуха, неоднозначны для разных сезонов. Для весны характерна тенденция снижения содержания антропогенных микроэлементов в аэрозоле центральной части Российской Арктики, суммарные годовые выпадения на поверхность в Арктике тоже уменьшились. По величине этот эффект вполне сравним с изменениями концентраций и выпадений, которые должны быть в результате уменьшения выбросов источников в эти годы.

С точки зрения поступления загрязнений из средних широт в Арктику, ослабление эффективности атмосферного канала может привести к возрастанию роли речного стока из-за попадания антропогенных составляющих из атмосферы непосредственно в воды рек, а также на снег, лед и в почву на территории их водосборов еще в приарктических районах.

### Введение

Содержание той или иной составляющей в атмосферном воздухе определяется балансом мощностей ее источников и стоков. Источниками антропогенных компонентов атмосферы являются отдельные промышленные предприятия, города или области, где сосредоточены множество предприятий и целые промышленные комплексы. Влияние таких территорий на состав атмосферы в удаленных районах земного шара в значительной степени зависит от процессов циркуляции воздушных масс, которые определяют направление и дальность переноса загрязнений в атмосфере. С другой стороны, одним из наиболее эффективных стоков аэрозольной примеси из атмосферы, по мере ее распространения воздушными массами от источника, является осаждение на подстилающую поверхность. Эффективность этого процесса зависит не только от свойств воздушной массы (влажность, осадки), но и от качества поверхности, что в некоторой степени зависит от циркуляции воздуха, которая определяет пути (траектории движения) воздушной массы над теми или иными территориями и поверхностями.

Наблюдаемые на рубеже XX и XXI вв. изменения климатических характеристик природной среды Северного полушария [1, 2] вызывают повышенный интерес ко всем явлениям, влияющим на состав и свойства природных объектов различных масштабов. В частности, изменился и характер атмосферной циркуляции в Северной полярной области (СПО),

что, в силу вышесказанного, не могло не повлиять на источники и стоки антропогенных составляющих атмосферы и на уровень загрязнения воздуха и подстилающей поверхности в Арктике.

В предыдущих публикациях авторов [3–5] изучались источники и стоки антропогенных микроэлементов в атмосферном аэрозоле Российской Арктики на базе анализа 10-летних синоптических данных за 1986–1995 гг. Настоящая работа продолжает исследования закономерностей и сезонных особенностей переноса воздушных масс и антропогенных аэрозольных составляющих к трем пунктам, расположенным в арктической зоне на территории России. Исходные ряды данных продлены до 2005 г., что позволяет рассматривать материалы настоящего исследования как климатически значимые результаты, выявляющие тенденции изменения процессов переноса воздуха и антропогенных примесей в нижней тропосфере и связанных с ними условий формирования состава атмосферы в Российской Арктике.

Основная цель работы заключалась в изучении и оценке долговременных тенденций изменения следующих процессов и характеристик:

пространственное распределение воздушных масс, поступающих в Российскую Арктику и уходящих из нее во время разных сезонов;

потенциальные возможности и влияние на состав атмосферы в Арктике наиболее значимых промышленных зон и регионов;

средние концентрации антропогенных микроэлементов в приземной атмосфере в Арктике;

потоки антропогенных микроэлементов на подстилающую поверхность, воздействие атмосферного канала переноса загрязнений на окружающую среду Арктики в целом.

## Постановка задачи и методика оценок

В последние годы траекторный подход стал применяться не только для изучения происхождения тех или иных составляющих конкретных проб воздуха, но и для исследования средних закономерностей в процессах дальнего переноса воздушных масс и вещества в атмосфере [6–9]. Надежность получаемых результатов в значительной степени определяется качеством и пространственной плотностью метеорологической информации, на которой основаны расчеты, а также способами представления и описания трансформации вещества во время переноса его в атмосфере. При использовании больших массивов траекторий можно рассчитывать перенос примеси по каждой траектории (с учетом соответствующих источников примеси и процессов очищения от нее), суммируя их вклады и анализируя пространственное поле распределения примеси [7, 8].

Другой подход предполагает статистическую обработку пространственного распределения самих траекторий, а затем, по усредненным параметрам, — поиск источников [9] или оценку распространения примеси от конкретных крупных регионов-источников. Именно последний вариант был предложен [10] и подробно описан [3, 4, 11] нами ранее и использован в данной работе для сохранения неизменности методики анализа всех долговременных изменений. Остановимся кратко на самых принципиальных моментах этого подхода.

Пунктами наблюдений для наших исследований являются три точки в Российской Арктике, расположенные на Земле Франца-Иосифа (ЗФИ), 81,1° с.ш., 56,3° в.д., на арх. Северная Земля (СЗ), 79,5° с.ш., 95,4° в.д., и на о. Врангеля (ВР), 71,0° с.ш., 178,5° з.д. Для каждой из этих точек анализировались 5-суточные прямые (воздух уходит от пункта) и обратные (воздух приходит к пункту) траектории движения воздушных масс для каждого дня одного из 4 мес на протяжении 20 лет (1986–2005 гг.). Траектории рассчитывались по данным Гидрометцентра России на 0 ч GMT (с интервалом 6 ч) на изобарических поверхностях 925 и 850 гПа для января, апреля, июля и октября. Предполагая, что выбранные месяцы являются показательными для соответствующих сезонов, можно получить представление о сезонной изменчивости изучаемых процессов и характеристик.

Для каждого пункта обратные и прямые траектории (отдельно) классифицировались по их пространственному положению [10]. Рассчитывались частоты поступления воздушных масс в пункты наблюдений с материков, из Арктики и из Тихого и Атлантического океанов, а также аналогичные распределения уходящего воздуха для четырех сезонов года. Термин «Арктика» в нашей классификации обозначает область внутри 70° с.ш. плюс остальная более южная часть Гренландии.

Наиболее подробно и последовательно методика количественных оценок переноса примеси в рамках такого подхода описана в [4, 10]. Решение уравнения баланса массы примеси в воздушном потоке во время ее переноса от источника  $i$  в пункт  $j$  можно представить в виде следующего выражения для концентрации  $C_{ij}$  примеси в пункте наблюдений  $j$ :

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

где  $Q_i$  — мощность выбросов примеси источником  $i$ ;  $\alpha_i \approx 0,1$  — доля примеси, оседающая на землю вблизи источника  $i$ . Функция  $Z_{ij}$ , названная нами функцией эффективности переноса (ФЭП), характеризует все атмосферные процессы, влияющие на перенос примеси по пути от источника  $i$  к пункту  $j$ . Она зависит от вероятности и скорости движения воздуха, которые определяются по траекториям, а также от скорости осаждения примеси из атмосферы во время переноса, зависящей от условий вертикального перемешивания и осадков. При расчетах ФЭП учитываются эмпирические данные о пространственно-временных изменениях температурных инверсий в приземном слое тропосферы [12, 13], статистические характеристики облачности [14] и осадков [15]. Таким образом, по величине ФЭП, в рамках предложенного подхода, оцениваются потенциальные возможности того или иного региона-источника оказать воздействие на состав атмосферы в рассматриваемых пунктах.

Подчеркнем, что наш подход и все дальнейшие рассуждения и выводы относятся к так называемой консервативной примеси, 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.

Скорость осаждения примеси на подстилающую поверхность представлялась в виде суммы скоростей сухого осаждения и осаждения осадками. Значения скорости сухого осаждения для разных сезонов выбирались по имеющимся литературным данным (эксперимент и модельные оценки), а скорости осаждения осадками рассчитывались по многолетним данным об атмосферных осадках из [15]. Результирующая скорость осаждения на поверхность считалась постоянной для каждого сезона и пункта, она не различалась для разных примесей и оставалась неизменной по мере их переноса к пункту наблюдений. Таким образом, все дальнейшие результаты справедливы для атмосферных составляющих, у которых скорости осаждения на поверхность в разные сезоны равны: зимой 0,05–0,07, весной 0,1–0,2, летом 0,9–1,2, осенью 0,4–0,8 см · с<sup>-1</sup>.

Процесс очищения арктической атмосферы от примесей рассматривался как совокупность трех процессов: 1) сухое осаждение, 2) осаждение осадками на подстилающую поверхность внутри региона (в пределах 70° с.ш.) и 3) атмосферный вынос за его пределы в более южные широты. Зная распределение уходящих из пунктов наблюдений воздушных масс, а также скорость осаждения примеси на подстилающую поверхность, можно оценить баланс

консервативной примеси после ее ухода от рассматриваемых пунктов наблюдений [5, 16].

В холодные месяцы скорость осаждения примеси на поверхность в Арктике очень мала и заметная доля примеси (30–50%) остается в арктической атмосфере дольше 5 сут, перемешиваясь там как в огромном резервуаре. Тогда, предполагая, что воздух, приходящий в пункты наблюдений из Арктики (в пределах 70° с.ш.), так же загрязнен, как и воздух в пункте наблюдений, и пренебрегая вкладом морского воздуха в концентрации антропогенных составляющих, результирующую среднюю (в течение месяца) концентрацию  $C_j$  примеси в районе пункта наблюдений  $j$  можно оценить из уравнения

$$C_j = \sum C_{ij} + q_j C_j, \quad (2)$$

где  $q_j$  – частота прихода арктических воздушных масс в пункт  $j$ , а суммирование ведется по всем источникам  $i$ . Вклад арктического воздуха – величина второго члена в правой части формулы (2) – значителен (25–50%) [4, 11]. Весной он больше, чем зимой, на ВР он несколько ниже, чем на ЗФИ и СЗ. При расчетах летних и осенних концентраций вклад арктического воздуха можно не учитывать, так как в теплое полугодие скорости осаждения антропогенных примесей на порядок больше, чем в холодное время года.

Зная для каждого пункта  $j$  среднюю концентрацию примеси  $C_j$  в приземном слое перемешивания  $H_j$  и скорость ее осаждения на поверхность  $K_j$ , можно оценить средние выпадения этой примеси на единицу поверхности:

$$D_j = C_j K_j H_j, \quad (3)$$

где  $H_j$  – средняя взвешенная высота слоя перемешивания, определяемая по данным о высоте и повторяемости приземных и приподнятых инверсионных слоев температуры вблизи пункта наблюдений  $j$ .

Методика оценки массы примеси, уносимой из Арктики воздушными потоками, на базе статистики прямых траекторий переноса воздушных масс подробно описана в [16, 17].

В данной статье оценки атмосферных концентраций примесей и их выпадений на поверхность приведены для четырех химических элементов – As, Ni, Pb, Cd – преимущественно антропогенного происхождения, источниками которых являются различные производственные и бытовые процессы. В литературе [18, 19] опубликованы данные о мощностях и составе атмосферных выбросов крупных европейских и российских промышленных регионов, являющихся источниками этих элементов в атмосферном аэрозоле. Для выявления эффекта, связанного именно с перестройкой циркуляционных процессов в атмосфере, мощности выбросов рассматриваемых микроэлементов регионами-источниками остаются фиксированными на данных этих работ, относящихся к началу 80-х гг. Изменение эмиссии источников за последние годы XX в. и возможные последствия этих изменений будут кратко рассмотрены в последнем разделе.

## Пространственные распределения траекторий переноса воздушных масс

Высокая межгодовая изменчивость пространственных распределений воздушных масс, приходящих к пунктам наблюдений или уходящих от них, обусловлена изменчивостью поля атмосферного давления и режимов циркуляции атмосферы. На рис. 1 представлены изменения пространственных распределений воздушных масс, приходящих на ЗФИ, СЗ и ВР с территориями Европы, Азии, Америки, Арктики и Тихого океана в апреле в течение 25 лет с 1981 по 2005 г. (добавлены данные 1981–1985 гг. из [10]).

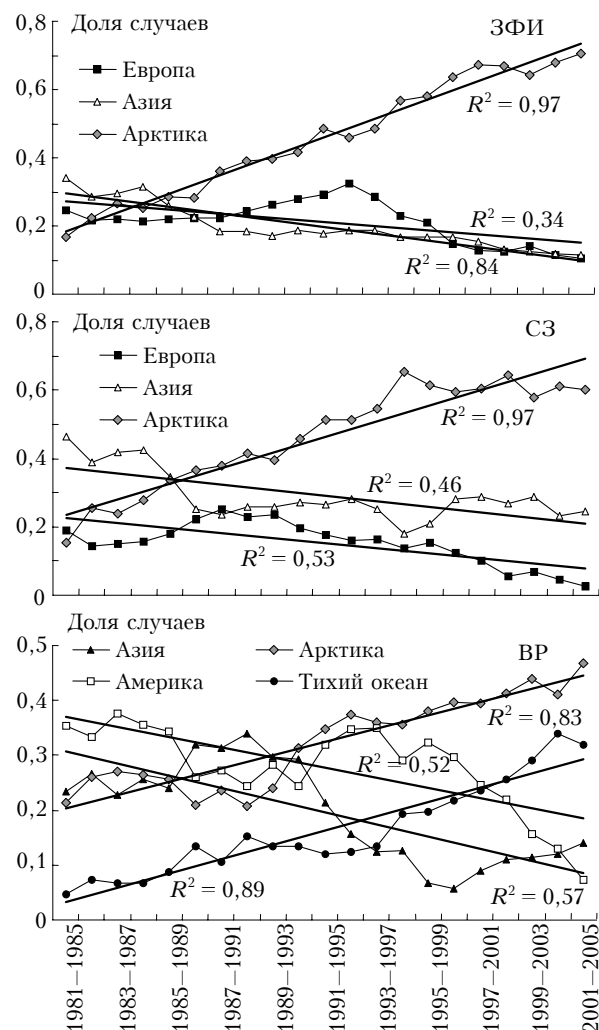


Рис. 1. Изменения пространственных распределений воздушных масс, приходящих на ЗФИ, СЗ и ВР с территорий Европы, Азии, Америки, Арктики и Тихого океана в апреле. Пятилетние средние частоты поступления. Прямые – линейная аппроксимация,  $R^2$  – коэффициент достоверности

Видно, что на ЗФИ и СЗ в начале 80-х гг. воздух из Европы, Азии и Арктики приходил приблизительно одинаково часто, а в начале XXI в. заметно преобладали арктические воздушные массы при снижении частоты поступления воздуха из Евразии. Для ВР вся картина несколько сложнее, но тоже есть четкие

закономерности. Если в начале анализируемого периода на ВР преобладал воздух с территории Америки и почти не поступал тихоокеанский воздух, то в конце чаще всего поступал воздух из Арктики и с территории Тихого океана, а доля континентальных воздушных масс значительно снизилась. Анализируя количественно такие распределения для каждого месяца, можно сделать вывод, что в последние 20 лет XX в. циркуляция атмосферы в северной полярной области значительно изменилась, и найти ряд статистических закономерностей в изучаемых распределениях.

Табл. 1 показывает выявленные тенденции изменения (за период 1986–2005 гг.) пространственных распределений воздушных масс, поступающих к пунктам наблюдений в разные сезоны. Оценки величины линейного тренда проводились по 5-летним сглаженным временным зависимостям частот поступления воздушных масс. Для наглядности величина изменения частоты (за весь период) выражена в процентах по отношению к ее значению для первых 5 лет (1986–1990 гг.). Видно, что во всех пунктах в приходящих воздушных массах возрастала доля арктического воздуха. И наоборот, убывали доли воздуха, приходящего на ЗФИ и на СЗ из Европы и на ВР из Америки и из Азии. Не выявлены изменения распределений для октября на ЗФИ и СЗ и для января на СЗ, когда рассматриваемые тренды оказались очень малы и/или незначимы.

Что касается пространственного распределения траекторий, по которым воздух уходит от пунктов наблюдений, то в этих распределениях значимые линейные тренды за рассматриваемые годы почти не обнаружены. Можно лишь уверенно утверждать, что в октябре от ВР воздух стал чаще уходить на территорию Тихого океана и реже в Арктику и в Азию.

Возможно, это согласуется с данными [20] об увеличении меридиональной составляющей скорости ветра, направленной на юг, на широте 70° с.ш. вблизи 180° в.д. на рубеже веков по сравнению с предшествовавшими 30 годами.

Таблица 1

Характеристики линейной аппроксимации 5-летних сглаженных частот поступления воздуха с территорий Европы, Азии, Арктики, Америки и Тихого океана. Тренд (в % по сравнению с 1986–1990 гг.) / коэффициент достоверности линейной аппроксимации  $R^2$

Пункт	Поступление воздуха	Январь	Апрель	Июль	Октябрь
ЗФИ	Из Европы	-23/0,33	<b>-71/0,80</b>	-54/0,38	-
	Азии	-	-	-	-
	Арктики	<b>+41/0,78</b>	<b>+75/0,89</b>	+33/0,47	-
СЗ	Европы	-	<b>-85/0,95</b>	-56/0,55	-
	Азии	-	-	<b>-73/0,81</b>	-
	Арктики	-	+26/0,57	+81/0,45	-
ВР	Азии	-68/0,45	-84/0,69	-51/0,60	-75/0,68
	Арктики	+112/0,40	<b>+61/0,79</b>	<b>+174/0,71</b>	<b>+307/0,72</b>
	Аmericи	-28/0,36	-	-43/0,64	<b>-61/0,78</b>
	С Тихого океана	-	+123/0,60	-	-

Примечание. Прочерки соответствуют малым величинам тренда или  $R^2$ . Выделены тренды, соответствующие  $R^2 > 0,7$ .

В табл. 2 и 3 приведены коэффициенты корреляции, показывающие взаимные связи различных каналов поступления воздуха к пунктам наблюдений.

Таблица 2

Коэффициенты корреляции (рассчитанные по ежегодным данным) частот прихода воздушных масс на ЗФИ, СЗ и ВР с территорий Европы (Евр), Азии (А), Арктики (Арк), Америки (Ам) и Тихого океана (То) или ухода воздуха на эти территории в разные месяцы

Пункт прихода/ухода	Месяц	Приход воздуха с территорий			Уход воздуха на территории		
		Евр-А	Евр-Арк	А-Арк	Евр-А	Евр-Арк	А-Арк
ЗФИ	Январь	0,44	-0,47	-0,35	-0,14	-0,23	0,19
	Апрель	0,24	<b>-0,86</b>	-0,47	-0,49	0,11	-0,10
	Июль	0,01	<b>-0,82</b>	-0,14	-0,20	-0,23	-0,41
	Октябрь	-0,31	<b>-0,72</b>	-0,33	-0,31	-0,22	-0,26
СЗ	Январь	<b>-0,61</b>	-0,46	-0,36	-0,32	-0,25	-0,09
	Апрель	-0,27	<b>-0,53</b>	<b>-0,56</b>	<b>-0,60</b>	-0,057	0,21
	Июль	-0,16	<b>-0,68</b>	-0,46	-0,01	-0,02	-0,46
	Октябрь	-0,31	<b>-0,72</b>	-0,33	-0,31	-0,22	-0,27
ВР		А-Ам	А-Арк	Ам-Арк	А-Ам	А-Арк	Ам-Арк
	Январь	-0,18	<b>-0,57</b>	-0,49	<b>-0,52</b>	-0,39	-0,18
	Апрель	-0,49	-0,26	-0,29	-0,29	-0,32	-0,31
	Июль	-0,16	<b>-0,65</b>	-0,23	<b>-0,53</b>	-0,25	<b>-0,51</b>
	Октябрь	0,11	<b>-0,69</b>	<b>-0,58</b>	-0,04	-0,34	-0,21
		А-То	Ам-То	То-Арк	А-То	Ам-То	То-Арк
	Январь	0,13	-0,15	-0,44	0,07	-0,23	<b>-0,69</b>
	Апрель	-0,04	-0,44	-0,41	-0,17	-0,44	-0,40
	Июль	-0,04	-0,31	-0,49	-0,24	0,046	-0,44
	Октябрь	-0,33	-0,14	-0,18	-0,21	-0,20	<b>-0,75</b>

Примечание. Выделены значения, которые по абсолютной величине больше 0,5.

Таблица 3

**Коэффициенты корреляции (рассчитанные по ежегодным данным) частот поступления воздушных масс с одной и той же территории (из Европы, из Азии или из Арктики) в два из трех рассматриваемых пунктов**

Поступление воздуха	Месяц	ЗФИ–СЗ	ЗФИ–ВР	СЗ–ВР
Из Европы	Январь	<b>0,60</b>	–	–
	Апрель	<b>0,69</b>	–	–
	Июль	0,47	–	–
	Октябрь	<b>0,76</b>	–	–
Из Азии	Январь	<b>0,54</b>	–0,11	–0,04
	Апрель	0,34	0,06	–0,25
	Июль	<b>0,37</b>	0,13	<b>0,59</b>
	Октябрь	<b>0,64</b>	–0,15	–0,26
Из Арктики	Январь	0,41	–0,22	0,08
	Апрель	0,45	0,18	–0,18
	Июль	0,39	0,31	0,41
	Октябрь	<b>0,53</b>	0,001	–0,07

**Примечание.** Выделены значения, которые по абсолютной величине больше 0,5. Прочерки соответствуют случаям, когда коэффициент корреляции не рассчитывался, поскольку воздух из Европы почти не поступает на ВР.

Так, на ЗФИ и СЗ воздух из Европы конкурирует с воздушными массами из Арктики, а на СЗ в январе выявляется конкуренция между воздушными массами из Европы и из Азии (см. табл. 2). Совсем в других условиях находится о. Врангеля, где азиатский воздух конкурирует с воздушными массами из Арктики или из Америки при наличии еще одного мощного канала из акватории Тихого океана.

В результате (см. табл. 3) на ЗФИ и СЗ частоты поступления европейского воздуха в разные годы хорошо коррелируют друг с другом, для воздушных масс из Азии это характерно только в январе и в октябре, а для арктического воздуха – только в октябре.

Таким образом, ЗФИ и СЗ часто находятся в пределах одного крупномасштабного атмосферного образования (циклона или антициклона). Режимы циркуляции воздуха в районах ЗФИ и ВР статистически и реально не связаны друг с другом. Для пары СЗ и ВР такая связь просматривается лишь в июле, когда частоты поступления воздушных масс из Азии и Арктики коррелируют друг с другом.

Итак, изменения циркуляции атмосферы за рассматриваемые 20 лет были таковы, что на Российском побережье Арктики усилилась зональность движения воздуха при ослаблении процессов меридионального переноса. С точки зрения переноса загрязнений из более южных широт в Арктику такие тенденции должны уменьшать эффективность загрязнения арктической атмосферы. Это будет показано в следующих разделах.

## Источники загрязнений и их вклады

Континентальный воздух, приходящий в Арктику, может нести антропогенные загрязнения в результате перемещения воздушных масс над крупными промышленными областями. Схема расположения всех крупных промышленных регионов Север-

ного полушария, которые рассматривались в качестве возможных источников антропогенных загрязнений атмосферы в пунктах наблюдений, приведена, например, в [11, 17].

В [3, 4, 11] содержится информация о численных значениях ФЭП [см. комментарии к формуле (1)] от ряда регионов-источников, над которыми располагались изучаемые траектории, для каждого сезона в период 1986–1995 гг. Изменения значений ФЭП в 1996–2005 гг. по сравнению со значениями в предшествующем десятилетии для наиболее значимых источников показаны на рис. 2.

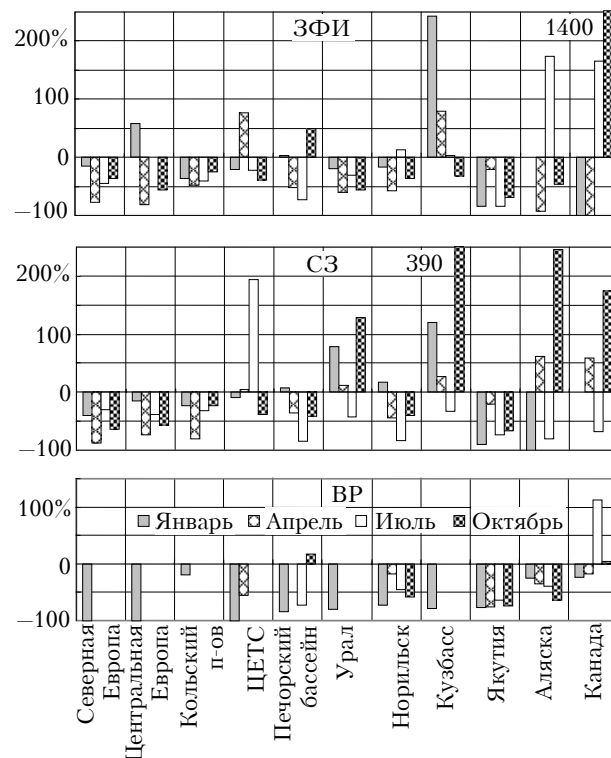


Рис. 2. Относительные изменения ФЭП примеси от регионов источников к ЗФИ, СЗ и ВР в разные месяцы. Разница средних значений для периодов 1996–2005 и 1986–1995 гг., отнесенная к значению для более раннего периода

Видно, что за рассматриваемые 20 лет потенциальные возможности большинства регионов-источников влиять на состав воздуха в Российской Арктике уменьшились. Противоположные тенденции заметны в основном на СЗ и в меньшей степени на ЗФИ. Необходимо отметить возрастание ФЭП от источников, расположенных на территории Северной Америки (Аляска, Канада), а также от удаленных регионов России – Кузбасса и Урала.

Отметим, что величина ФЭП характеризует лишь возможность каждого источника внести загрязнения в атмосферу вблизи соответствующего пункта. Вклады же каждого региона в содержание конкретных примесей определяются по формуле (1) с использованием данных об атмосферных выбросах  $Q_i$  этих примесей рассматриваемыми регионами. И наиболее значимыми могут оказаться не те источники, у которых больше величина ФЭП, и не те, у которых более мощные выбросы.

Оценки вкладов регионов-источников, а также атмосферных концентраций и выпадений микроэлементов на подстилающую поверхность проведены лишь для ЗФИ и СЗ, поскольку для ВР это невозможно из-за отсутствия достаточно полных данных о составе и мощностях атмосферных выбросов промышленными районами, расположенными в Северной Америке.

В [4, 11] содержатся сведения о соотношении вкладов регионов-источников в концентрации рассматриваемых микроэлементов на ЗФИ и СЗ, характерном для периода 1986–1995 гг., когда наиболее значимыми источниками рассматриваемых микроэлементов были Северная Европа, Кольский п-ов, Норильск и Урал, а в холодную половину года – сам арктический воздух [см. формулу (2)]. Изменения вкладов регионов-источников в содержание антропогенных микроэлементов в атмосфере ЗФИ и СЗ в разные сезоны, обнаруженные в 1996–2005 гг. по сравнению с изменениями в предшествующие десятилетия, весьма неоднозначны (табл. 4).

Таблица 4  
Изменение (для десятилетия 1996–2005 гг. по сравнению с 1986–1995 гг.) вкладов регионов-источников в загрязнение атмосферы на ЗФИ и СЗ в разные месяцы

Регион-источник	Январь		Апрель		Июль		Октябрь	
	ЗФИ	СЗ	ЗФИ	СЗ	ЗФИ	СЗ	ЗФИ	СЗ
Сев. Европа	–	–	–	–	–	+	–	–
Кольский п-ов	–	–	–	–	+	+	+	–
Урал	–	+	–	+	–	–	–	–
Норильск	–	–	–	–	+	–	–	–
Кузбасс	+	+	+	+	–	–	–	–
Арктика	+	–	++	+	–	–	–	–

Примечание. Знаки «+» и «–» означают увеличение или уменьшение больше 5%; двойной значок – больше 20%; пустая клетка – изменение меньше 5%.

Увеличился вклад Уральского региона, особенно на СЗ, главным образом для мышьяка и свинца, а Кузбасс стал значительным источником всех рассматриваемых элементов в атмосфере обоих пунктов.

В апреле значительно вырос вклад самого арктического воздуха как источника накопленных загрязнений в холодные месяцы. Однако заметно уменьшились вклады Северной Европы и Норильска. В результате в последние годы формирование содержания рассматриваемых микроэлементов в атмосфере на ЗФИ и СЗ в основном происходит от шести источников, средние соотношения вкладов которых в разные месяцы представлены на рис. 3.

При анализе сезонных различий в этих распределениях необходимо иметь в виду, что абсолютная концентрация антропогенной примеси летом приблизительно на порядок меньше, чем зимой.

Для ВР остается справедливым вывод [4, 11], что в среднем во все сезоны вклад североамериканских источников антропогенных загрязнений в состав атмосферы Восточной Арктики является определяющим (по сравнению с евроазиатскими источниками).

### Атмосферные концентрации микроэлементов

В [4, 11] было показано, что оценки с помощью предложенной нами методики средних атмосферных концентраций рассматриваемых микроэлементов в Российской Арктике для периода 1986–1995 гг. хорошо соответствуют реальным многолетним экспериментальным данным, полученным на территории Северной Канады в 1981–1995 гг. [21], и единичным измерениям на Северной Земле в конце 80-х гг. [22]. В рамках данной работы проведено сравнение средних (в течение 1 мес) приземных концентраций микроэлементов, рассчитанных для периода 1996–2005 гг., с результатами для предшествующего десятилетия. На рис. 4 представлены относительные изменения концентраций мышьяка, никеля, свинца и кадмия в атмосфере на ЗФИ и СЗ в разные месяцы.

Важно, что в атмосфере ЗФИ на рубеже веков уменьшилось содержание всех рассмотренных элементов (кроме Cd зимой), тогда как на СЗ картина не столь однозначна. Там концентрации растут зимой (для всех элементов) и осенью (кроме As и Ni) при

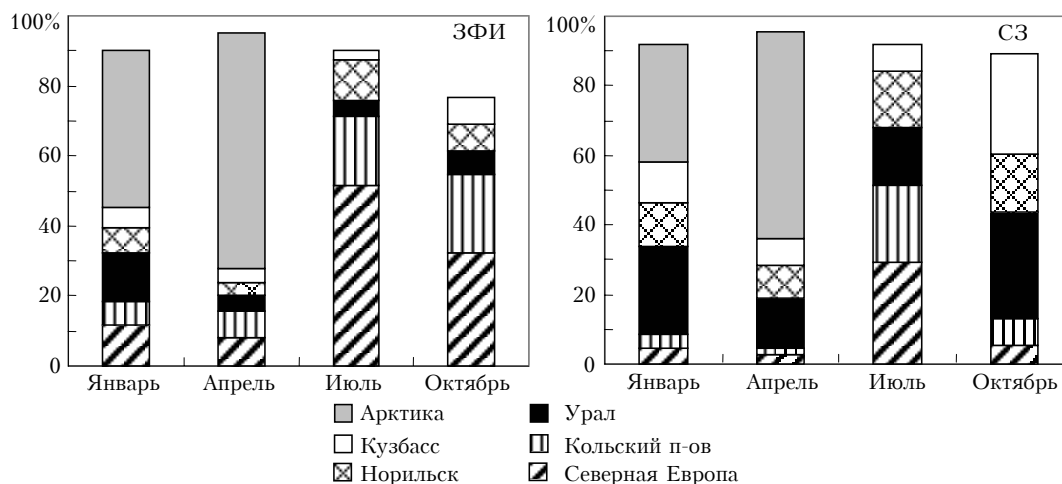


Рис. 3. Относительные вклады шести наиболее значимых регионов-источников в содержание примеси в атмосфере ЗФИ и СЗ в разные месяцы. Средние соотношения для всех рассмотренных микроэлементов

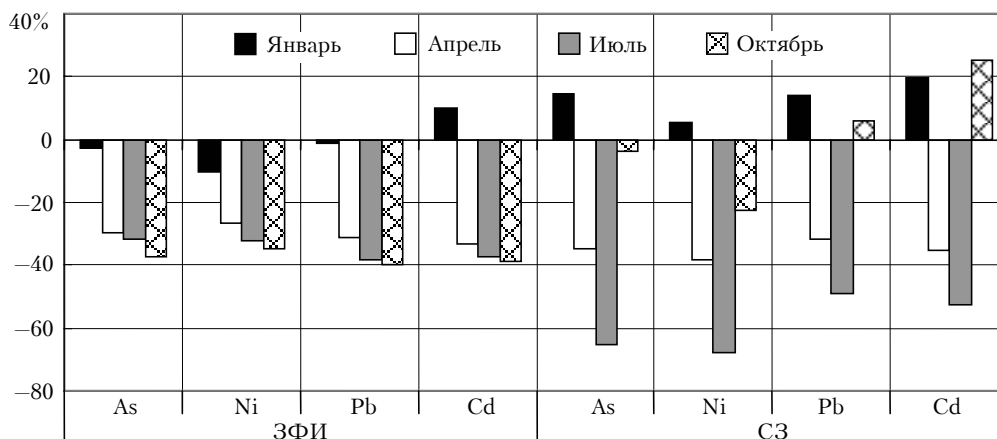


Рис. 4. Относительные изменения концентраций мышьяка, никеля, свинца и кадмия в атмосфере на ЗФИ и СЗ в разные месяцы. Разница средних концентраций за периоды 1996–2005 и 1986–1995 гг., отнесенная к значению для более раннего периода

более значительном (по сравнению с ЗФИ) уменьшении концентраций весной и летом (увеличилась амплитуда сезонного хода).

Поскольку многолетние непрерывные наблюдения за элементным составом атмосферного аэрозоля в Российской Арктике не проводились, мы сравнили полученные нами тенденции изменения концентраций антропогенных микроэлементов в атмосфере Российской Арктики с наблюдаемыми трендами концентраций антропогенных составляющих аэрозоля, полученными в Канадской Арктике [21] и на Аляске [23] (рис. 5).

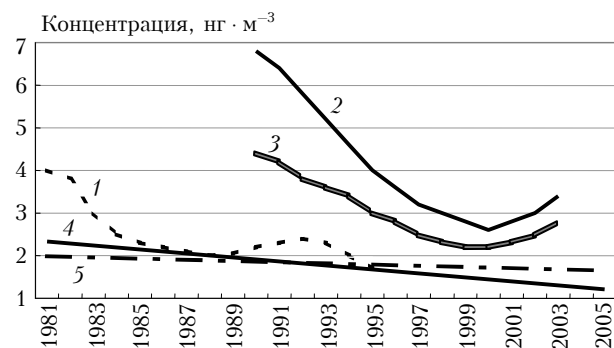


Рис. 5. Сравнение рассчитанных тенденций изменения концентраций свинца на арх. Северная Земля [прямые сплошная 4 (апрель) и штрихпунктирная 5 (январь + апрель)] с экспериментальными результатами, полученными для свинца (1) и сажки (2) в Канадской Арктике и на Аляске (3) [20, 21] в холодную часть года

Действительно, в конце XX в. наблюдается тенденция снижения загрязненности арктической атмосферы, которая в реальной атмосфере вызвана не только изменением циркуляции, но и уменьшением эмиссии источников [24, 25], о чем пойдет речь в последнем разделе.

## Очищение арктической атмосферы

Для существования и развития арктических экосистем важную роль играют выпадения антропогенных (часто токсичных) примесей из атмосферы на подстилающую поверхность. Как показали наши оценки, за рассматриваемые 20 лет соотношения вертикального (осаждение на поверхность) и горизонтального (вынос южнее 70° с.ш.) механизмов очищения арктической атмосферы качественно не изменились, а количественные различия не превосходят ошибок расчетов.

В холодную половину года количество примеси, уносимое из Арктики воздушными потоками, оседающее на поверхность и остающееся в атмосфере в пределах 70° с.ш., примерно одинаковое. В теплое полугодие почти все примеси, принесенные в Арктику, оседают в течение 5 сут на подстилающую поверхность в пределах 70° с.ш. В результате очищение арктической атмосферы в разные сезоны происходит следующим образом: 1) зимой наиболее эффективен процесс выноса примеси воздушными потоками за пределы Арктики; 2) весной эффективности этого процесса и процесса сухого осаждения на поверхность сравнимы между собой; 3) в холодное полугодие осаждение примесей осадками незначительно; 4) в теплую половину года арктическая атмосфера очищается преимущественно путем осаждения примесей на поверхность, причем преобладает вымывание осадками.

На рис. 6 показаны изменения, которые произошли в 1996–2005 гг. (по сравнению с предшествующими годами) в мощностях процессов, очищающих атмосферу Арктики от антропогенных примесей в разные месяцы.

Уверенно можно говорить об уменьшении выпадений всех элементов на подстилающую поверхность в апреле, в июле и в целом за год и о возрастании в январе. Средние потоки рассматриваемых четырех микроэлементов на единицу поверхности в районах ЗФИ и СЗ для периода 1996–2005 гг. приведены в табл. 5.

Различия между этими двумя пунктами наблюдений составляют 4–7%. По табл. 5 можно судить о сезонной зависимости потока антропогенной при-

меси на поверхность в Арктике с максимальными значениями в теплое время года. Считая, что все четыре

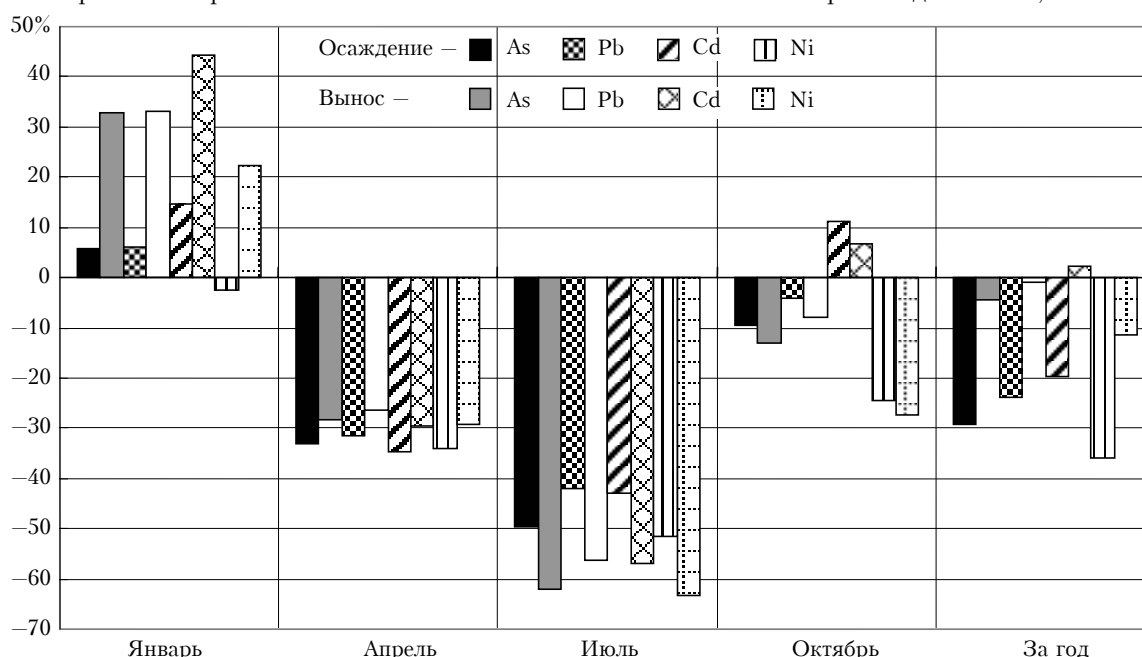


Рис. 6. Относительные изменения мощностей вертикального (осаждение) и горизонтального (вынос) каналов очищения арктической атмосферы. Разница количества вещества, удаляемого из атмосферы за месяц/год, для периодов 1996–2005 и 1986–1995 гг., отнесенная к значению для более раннего периода

Таблица 5

Средний поток антропогенных химических элементов из атмосферы на подстилающую поверхность в районе ЗФИ и СЗ в 1996–2005 гг.,  $\text{мкг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{мес}^{-1}$  ( $\text{г} \cdot \text{км}^{-2} \cdot \text{мес}^{-1}$ )

Месяц	As	Ni	Pb	Cd
Январь	0,29	0,92	3,5	0,08
Апрель	0,29	0,94	3,4	0,08
Июль	0,66	2,20	7,9	0,19
Октябрь	0,85	2,46	9,2	0,26

сезона делятся по 3 мес, можно оценить, что за год по атмосферному каналу в Арктику поступает примерно 140 т мышьяка, 440 т никеля, 1600 т свинца и 40 т кадмия. Это составляет (в зависимости от конкретного элемента) 6–10% от атмосферных выбросов всех регионов-источников, поставляющих этот химический элемент в рассматриваемые районы Арктики, и не превышает 1–3% от выбросов всех антропогенных источников Европы и российской части Азии. Объем поступления антропогенных микроэлементов в Арктику в 1996–2005 гг. уменьшился по сравнению с предшествующим десятилетием на 15% (для Cd) – 30% (для Ni). Подчеркнем, что приведенные в табл. 5 абсолютные значения вертикальных потоков из атмосферы на поверхность представляют собой лишь антропогенную часть соответствующих величин без учета вкладов естественных источников (морская поверхность, почва, вулканы и т.д.) в атмосферные концентрации и, следовательно, в выпадения рассматриваемых элементов.

Как было отмечено раньше, в арктической атмосфере происходят перемешивание и перераспределение антропогенных загрязнений в Северном полушарии. Если в 1986–1995 гг. в среднем за год в Арктике осаждалось на поверхность около половины занесенной туда воздушными потоками антропогенной примеси, а остальное выносилось воздушными массами обратно в более южные широты, то в последнее десятилетие этот баланс изменился. Теперь только около 1/3 примеси, принесенной за год воздушными массами от антропогенных источников в Арктику, выносится на юг, оставшиеся 2/3 примеси выпадают на подстилающую поверхность севернее 70° с.ш. и могут участвовать впоследствии в биогеохимических циклах арктических экосистем.

### Возможное влияние других факторов

Основным фактором, определяющим источники антропогенных примесей в арктической атмосфере, является уменьшение в 90-х гг. мощностей выбросов в атмосферу практически всех рассматриваемых микроэлементов [24]. По данным Метеорологического синтезирующего центра «Восток» (МСЦ-В) [25] об изменениях в эти годы эмиссии свинца и кадмия странами Европы можно сделать вывод, что эмиссия свинца уменьшилась в среднем по Европе приблизительно в 5 раз, а кадмия – в 2 раза (для Российской части – в 1,5 раза оба элемента). При неизменности процессов циркуляции это привело бы к пропорциональному уменьшению концентраций этих элементов в атмосфере Арктики. Следовательно, эф-



фект уменьшения концентраций на 40% (см. рис. 4) в результате изменения циркуляционных процессов в атмосфере, полученный нами, вполне сопоставим с результатом, который может быть вызван изменениями эмиссии регионов-источников. И оба эти фактора уменьшают загрязненность арктической атмосферы, приводя к экспериментальным зависимостям, например, концентраций свинца и сажи, приведенным на рис. 5.

Фактором, влияющим на стоки примеси из атмосферы, является количество осадков. По данным [2], в конце XX в. количество осадков на территории полосы 60–70° с.ш. в целом возросло (особенно в Евразийском секторе), а в более северных широтах (70–80°) – уменьшилось. Это должно увеличивать скорость осаждения примеси на подстилающую поверхность по пути переноса в Арктику (за пределами 70° с.ш.) и, следовательно, уменьшать содержание антропогенных загрязнений в атмосфере арктических широт. В результате возможно возрастание роли речного стока как канала поступления загрязнений в окружающую среду Арктики, поскольку еще в приполярных районах загрязнения из атмосферы будут выпадать непосредственно в воды рек, а также на снег, лед и в почву на территории их водосборов.

### Выводы

Анализ траекторий переноса воздушных масс в Российскую Арктику показал, что за 25 лет (с 1981 по 2005 г.) над территорией северной Евразии усилилась зональность в процессах циркуляции воздуха при ослаблении меридионального переноса, особенно весной.

В результате перестройки циркуляционных процессов изменения атмосферных концентраций As, Ni, Pb и Cd и их выпадений на подстилающую поверхность в Российской Арктике неоднозначны: на Земле Франца-Иосифа – уменьшение в течение всего года; на Северной Земле – уменьшение только весной и летом, а зимой – увеличение. Однако суммарные годовые выпадения уменьшились на 20–35% (в зависимости от конкретного микроэлемента).

За год в Арктику заносится около 6–10% от атмосферных выбросов рассматриваемых микроэлементов всеми регионами-источниками, от которых эти элементы заносятся севернее 70° с.ш., что не превышает 1–3% от выбросов всех антропогенных источников Европы и российской части Азии. Поступление антропогенных микроэлементов в Арктику в 1996–2005 гг. уменьшилось по сравнению с объемом в предшествующем десятилетии на 15–30%.

В холодные сезоны в арктической атмосфере происходят перемешивание и перераспределение антропогенных загрязнений, источники которых расположены в основном в средних широтах Северного полушария. В последнее десятилетие в среднем около 1/3 примеси, принесенной воздушными массами за год в Арктику от антропогенных источников, выносятся обратно в более южные широты. Оставшиеся 2/3 примеси выпадают на подстилающую поверхность севернее 70° широты и могут участвовать впо-

следствии в биогеохимических циклах арктических экосистем.

Ослабление воздушного канала как поставщика антропогенных примесей из средних широт в Арктику может привести к возрастанию роли в этом процессе речного стока, так как еще в приполярных районах загрязнения из атмосферы будут осаждаться в воды рек, а также на снег, лед и почву на территории их водосборов.

1. Израэль Ю.А., Груза Г.В., Катцов В.М., Мелешко В.П. Изменения глобального климата. Роль антропогенных воздействий // Метеорол. и гидрол. 2001. № 5. С. 5–21.
2. Формирование и динамика современного климата Арктики. СПб.: Гидрометеоздат, 2004. 254 с.
3. Vinogradova A.A. Anthropogenic pollutants in the Russian Arctic atmosphere: sources and sinks in spring and summer // Atmos. Environ. 2000. V. 34. N 29–30. P. 5151–5160.
4. Виноградова А.А., Пономарева Т.Я. Сезонные изменения атмосферных концентраций и выпадений антропогенных примесей в Российской Арктике // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2001. Т. 37. № 6. С. 761–770.
5. Виноградова А.А., Пономарева Т.Я. Очищение арктической атмосферы путем выноса загрязнений в средние широты // Оптика атмосфер. и океана. 2001. Т. 14. № 6–7. С. 505–509.
6. Stohl A. Computation, accuracy and applications of trajectories – A review and bibliography // Atmos. Environ. 1998. V. 32. N 6. P. 947–966.
7. 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.
8. Akeredolu F.A., Barrie L.A., Olson M.P., Oikawa K.K., Pacyna J.M., Keeler G.J. The flux of anthropogenic trace metals into the Arctic from the mid-latitudes in 1979/80 // Atmos. Environ. 1994. V. 28. N 8. P. 1557–1572.
9. 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.
10. Виноградова А.А., Егоров В.А. Оценка вкладов промышленных регионов Северного полушария в загрязнение атмосферы Российской Арктики // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 1997. Т. 33. № 6. С. 750–757.
11. Виноградова А.А. Антропогенный аэрозоль над морями Северного Ледовитого океана: Автореф. дис. ... докт. геогр. наук. М., 2004. 39 с.
12. Бурова Л.П. Влагосодержание инверсионных слоев атмосферы в Арктике // Тр. ААНИИ. Л.: Гидрометеоздат, 1981. Т. 370. С. 111–130.
13. Нагурный А.П., Тимерев А.А., Егоров С.А. Пространственно-временная изменчивость инверсий в нижней тропосфере Арктики // Докл. АН СССР. 1991. Т. 319. № 5. С. 1109–1113.
14. Макитас А.П., Священников П.Н. Характеристики облачности Арктического бассейна и опыт их статистического моделирования // Тр. ААНИИ. СПб.: Гидрометеоздат, 1998. Т. 439. С. 135–148.
15. Брызгин Н.Н. Характеристики осадков в Российской Арктике, влияющие на удаление загрязнений из атмосферы // Тр. ААНИИ. СПб.: Гидрометеоздат, 1998. Т. 439. С. 135–148.

16. *Виноградова А.А., Бурова Л.П.* О механизмах очищения арктической атмосферы // Докл. РАН. 2001. Т. 379. № 3. С. 377–380.
17. *Виноградова А.А., Пономарева Т.Я.* Источники и стоки антропогенных пассивных примесей в атмосфере Российской Арктики весной и летом // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2000. Т. 36. № 3. С. 357–365.
18. *Pacyna J.M., Semb A., Hanssen J.E.* Emission and long-range transport of trace elements in Europe // *Tellus*. В. 1984. V. 36. N 3. P. 163–178.
19. *Pacyna J.M., Ottar B., Tomza U., Maenhaut W.* Long-range transport of trace elements to Ny-Alesund, Spitsbergen // *Atmos. Environ.* 1985. V. 19. N 6. P. 857–864.
20. *Виноградова А.А.* Изменение режима ветра на евразийском побережье Северного Ледовитого океана в конце XX века // *Оптика атмосфер. и океана*. 2006. Т. 19. № 6. С. 475–480.
21. *Sirois A., Barrie L.A.* Arctic lower tropospheric aerosol trends and composition at Alert, Canada: 1980–1995 // *J. Geophys. Res. D*. 1999. V. 104. N 9. P. 11,599–11,618.
22. *Виноградова А.А., Полиссар А.В.* Элементный состав аэрозоля в атмосфере центральной части Российской Арктики // *Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана*. 1995. Т. 31. № 2. С. 264–274.
23. *Sharma S., Andrews E., Barrie L.A., Jdren J.A., Lavoué D.* Variations and sources of the equivalent black carbon in the high Arctic revealed by long-term observations at Alert and Barrow: 1989–2003 // *J. Geophys. Res.* 2006. V. 111. D14208. doi:10.1029/2005JD006581.
24. *Pacyna J.M.* Source inventories for atmospheric trace metals // *Atmos. Particles* / Ed. by R.M. Harrison and R. Van Grieken. London; New York: Elsevier, 1998. P. 385–423.
25. <http://www.msceast.org>.

*A.A. Vinogradova, T.Ya. Ponomareva.* **Sources and sinks of anthropogenic microelements in the Arctic atmosphere: trends from 1981 to 2005.**

The long-term data on air mass transport to three points in the Russian Arctic and out of them were analyzed. Average atmospheric concentrations and average fluxes onto the surface of anthropogenic microelements (As, Ni, Pb, Cd) in the Russian Arctic for two decades (1986–1995) and (1996–2005) were estimated. The differences in decadal mean pollution characteristics due to varying the atmospheric circulation were analyzed for the different seasons.

The changes in the processes of pollution or cleaning the Arctic air have not a single meaning for the different seasons. In spring we revealed the tendency to decrease in anthropogenic pollution of atmospheric aerosol in the central part of the Russian Arctic. The yearly mean values of air concentrations and deposition fluxes were also decreased. This effect is only due to air circulation reconstruction and its value is quite comparable with the change which could be as a result of decreasing the anthropogenic atmospheric emissions in Europe and Russia, occurred really during these years.

In the view of pollution transport to the Arctic, weakening the atmospheric way can lead to increase the role of rivers because of precipitation of pollutants on water, ice, snow, and soil at the territories of river's drainage.