

На правах рукописи

ВИНОГРАДОВА Анна Александровна

УДК 551.550.42

**АНТРОПОГЕННЫЙ АЭРОЗОЛЬ
НАД МОРЯМИ СЕВЕРНОГО ЛЕДОВИТОГО ОКЕАНА**

Специальность 25.00.28 – Океанология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора географических наук

Москва -- 2004 г.

Типография «ЮСК-ПОЛИГРАФИЯ»
Подписано в печать 10.09.2004г.
Усл.печ.л. 1,5. Тираж 100 экз. Заказ 681.
Тел.: 963-41-11, 964-31-39
107258, Москва, ул.Краснобогатырская 90.

Работа выполнена в Институте физики атмосферы им. А.М. Обухова
Российской Академии Наук, г. Москва

Официальные оппоненты:

Доктор географических наук Зайцева Нина Александровна
Доктор химических наук, профессор Огородников Борис Иванович
Доктор физико-математических наук Бышев Владимир Ильич

Ведущая организация: Арктический и Антарктический научно-исследовательский
институт (АНИИ)

Защита состоится « 20 » октября 2004 г. в 14:00 часов на заседании
специализированного Совета Д.002.236.02 по присуждению ученой степени докто-
ра наук в Институте океанологии им. П.П. Ширшова Российской Академии Наук
по адресу: 117851 Москва, Нахимовский проспект, д. 36.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Института океа-
нологии им. П.П. Ширшова РАН.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2004 г.

Ученый секретарь
специализированного Совета,
кандидат географических наук



С.Г. Панфилова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Атмосфера и гидросфера – два канала, по которым осуществляется перенос вещества из средних широт в Арктику. При этом на территории Арктики происходит разгрузка воздушных потоков и речных вод от тех загрязнений, которые они накопили в среднеширотных районах, и особая уязвимость окружающей среды арктического региона определяется своеобразием миграции и поступления загрязняющих веществ в ее депонирующие среды. В этой связи немаловажным является изучение источников антропогенных микроэлементов в арктической атмосфере, а также механизмов ее очищения и воздействия на различные объекты природной среды Арктики.

Специфика климатических и метеорологических условий, существующих в северной полярной области (СПО), определяет своеобразие природных явлений, происходящих в этом регионе. В частности, свойства и состав атмосферного аэрозоля в Арктике во многом существенно отличаются от аналогичных характеристик атмосферы других широт. Своеобразие процессов трансформации аэрозоля и его влияния на окружающую среду в арктическом регионе связано с изменениями ряда физических параметров атмосферы и подстилающей поверхности при переходе от полярной ночи зимой к летнему незаходящему солнцу и обратно. Большую часть года (200-300 дней в году) поверхность Северного Ледовитого океана (СЛО) и суши в Арктике скована льдом и скрыта слоем снега, поэтому влияние природных (терригенного и морского) локальных и региональных источников аэрозольного вещества на состав арктического аэрозоля на долгое время исключается. В результате создаются условия, при которых определяющее воздействие на природную среду Арктики оказывают атмосферные аэрозоли, в том числе и антропогенные, принесенные туда из среднеширотных районов планеты.

Несмотря на то, что последние 15-20 лет XX века ознаменовались активным изучением состава и свойств атмосферы Арктики, этих усилий оказалось недостаточно для выявления наиболее общих закономерностей в процессах воздействия деятельности человека на арктическую атмосферу и оценки возможных последствий этого явления. Поэтому в начале XXI века задача изучения временной и пространственной изменчивости уровня загрязнения атмосферы Арктики, а также источников и стоков этого загрязнения выделяется как одна из приоритетных в ряду исследований глобальных изменений климата и окружающей среды на нашей планете [АМАР, 1997; 2002]. Это связано не только с возможными региональными изменениями природной среды арктических экосистем, но также с возможностью огромного и необратимого влияния этих изменений на все формы жизни далеко за пределами арктического региона [Климатический режим Арктики ..., 1991].

Основными (по массе) антропогенными компонентами аэрозоля в Арктике являются сульфаты, органика и элементарный углерод – сажа. Воздействие этих веществ на окружающую среду неодинаково. Наличие сульфатов и антропогенной органики в атмосфере приводит к загрязнению и закислению осадков и, соответственно, влияет на химический состав снега, льда, воды и почвы, на которые они выпадают. Что касается сажи, то она изменяет радиационный баланс атмосферы,

влияя на оптические свойства тропосферы и подстилающей поверхности, и, следовательно, является важным климатообразующим фактором в Арктике.

Современные аналитические методы позволяют определять в аэрозольных пробах содержание еще около 40 химических микроэлементов, общая масса которых не превышает 5% от всей массы аэрозольного вещества. Однако изучение столь малых компонент оказалось весьма полезно не только с точки зрения воздействия отдельных (часто токсичных) элементов на окружающую среду. Многие из этих микроэлементов являются трассерами при исследовании происхождения аэрозоля, путей его дальнего переноса в атмосфере, процессов его трансформации и осаждения на подстилающую поверхность. Именно такие малые составляющие арктического аэрозоля были объектом наших исследований.

Еще в 40-50-х годах в весеннее время в окрестностях Аляски пилоты метеослужбы наблюдали замутненность атмосферы (с дальностью видимости до 8 км) [Mitchell, 1957], названную «арктической дымкой» (Arctic haze). Совпадение в весеннее время положений максимумов в сезонных зависимостях коэффициента светорассеяния арктического воздуха и содержания в нем различных составляющих антропогенного происхождения привело к тому, что основной причиной образования дымки стало считаться загрязнение арктической атмосферы продуктами человеческой деятельности на материках вокруг СЛО. В результате к этому вопросу было привлечено внимание не только ученых, но и политиков.

К середине 80-х годов XX столетия (т.е. к началу наших исследований) только-только была осознана необходимость подробнейшего изучения свойств и состава арктического аэрозоля. Развитие к этому моменту экспериментальной и аналитической базы позволило организовать круглосуточные круглогодичные наблюдения за уровнем загрязнения атмосферного воздуха, в том числе и за его элементным составом, на Аляске, в Гренландии, в Канадском и Норвежском секторах Арктики. В Российской Арктике в те годы на некоторых полярных станциях в отдельных экспедициях проводились измерения распределения аэрозольных частиц по размерам и спектральных характеристик арктической атмосферы [Сакунов и др., 1990]. Первые измерения элементного состава аэрозоля в Российской Арктике, проведенные в 1968 г. [Биненко и др., 1981], не повторялись до 1984-85 гг. (наши первые исследования на о. Врангеля [1]). Это было связано, с одной стороны, с недостатками экспериментальной базы, поскольку для работ в Арктике требовались уникальные высокообъемные пробоотборники и развитые методики обнаружения минимальных количеств отдельных химических элементов в аэрозольных пробах. С другой стороны, тормозом в развитии таких исследований была информационная закрытость СССР, когда научные работы в Арктике ограничивались, а их результаты подлежали цензуре и не публиковались в открытой печати.

Однако наша страна имеет северную границу, протянувшуюся вдоль половины побережья Северного Ледовитого океана, и оставлять такое огромное «белое пятно» на карте изучения Арктики в конце концов стало невозможно. Данные ученых западных стран свидетельствовали (по их мнению) о том, что российские промышленные комплексы, расположенные вблизи полярного круга (на Кольском полуострове и в районе Норильска) загрязняют атмосферу Арктики и приближают экологи-

ческую катастрофу в этом регионе [Shaw, 1982; Rahn et al., 1983]. Это обострило необходимость экспериментального исследования состава атмосферы в Российской части Арктики, изучения и прогнозирования воздействия российских промышленных областей на арктические экосистемы.

Наши исследования элементного состава аэрозоля, выполненные во второй половине 80-х годов на двух российских станциях, расположенных на арх. Северная Земля и на о. Врангеля, были первыми более или менее регулярными (в течение 5 лет) наблюдениями такого рода. Все они ограничивались лишь весенним сезоном, когда арктическая атмосфера содержит наибольшее количество антропогенных составляющих. К сожалению, отсутствие достаточного материального обеспечения не позволило в последующие годы продолжить эти исследования и организовать круглогодичные наблюдения за составом атмосферы в Российской Арктике. Работы, проводимые с начала 90-х годов до настоящего времени на научно-исследовательских судах, являются эпизодическими, поскольку определяются режимом конкретных экспедиций, и почти все они приходятся на летне-осенний сезон, когда большая часть российских арктических морей открыта ото льда. Для получения же достоверной информации о закономерностях и особенностях в процессах загрязнения атмосферы необходимо анализировать многолетние непрерывные информационные массивы.

Логическим продолжением наших экспериментальных работ стал анализ многолетней метеорологической и синоптической информации о движении воздушных масс в СПО, на основании которого были выполнены модельные оценки переноса антропогенных примесей в Российскую Арктику и из нее. Это позволило оценить средние концентрации (и их сезонные изменения) ряда антропогенных микроэлементов (в том числе, тяжелых металлов) в арктической атмосфере, а также выявить их наиболее значимые источники и стоки. Существующие экспериментальные данные об элементном составе аэрозоля в Российской части Арктики, хотя они и охватывают в основном лишь весенний и летний сезоны и являются результатом эпизодических наблюдений, оказались чрезвычайно полезными для верификации модельных оценок.

Полученные оценки среднего уровня загрязненности арктической атмосферы были применены для определения средних вертикальных потоков ряда антропогенных микроэлементов на подстилающую поверхность в Арктике и вклада атмосферных аэрозолей в формирование состава водной взвеси арктических морей России.

Целью работы являлось определение уровня загрязненности атмосферы в Российской Арктике как по результатам экспериментального изучения элементного состава атмосферного аэрозоля, так и на базе модельных расчетов. Приоритетные направления исследований: 1) выявление конкретных крупных промышленных регионов-источников антропогенных составляющих аэрозоля в атмосфере Российской Арктики; 2) изучение процессов очищения арктической атмосферы от антропогенных примесей; 3) оценка средних потоков антропогенных примесей из атмосферы на поверхность Северного Ледовитого океана и его морей; 4) исследование сезонных и многолетних вариаций изучаемых процессов и характеристик.

На защиту выносятся: результаты экспериментального определения элементного состава атмосферного аэрозоля в Российской Арктике и происхождения его антропогенных компонент, полученные автором средние закономерности в процессах формирования антропогенных аэрозольных примесей в арктической атмосфере в разные сезоны и оценки средних атмосферных концентраций ряда микроэлементов и их потоков на подстилающую поверхность в Арктике, результаты анализа многолетних тенденций изменения изучаемых процессов и характеристик в конце XX века.

Научная новизна результатов определяется в первую очередь объектом исследования – состав атмосферного аэрозоля в Российской Арктике, недостаток сведений о котором в последние 15-20 лет тормозит изучение свойств арктической атмосферы и экосистемы Арктики в целом. В частности, новыми можно назвать следующие результаты:

- Получен и проанализирован первый и до сих пор единственный многолетний ряд экспериментальных данных об элементном составе аэрозоля в атмосфере Российской Арктики в весеннем сезоне, когда ее загрязнение максимально.
- Оценены потенциальные возможности наиболее крупных промышленных регионов Северного полушария влиять на загрязнение атмосферы в Российской части Арктики и выявлены наиболее значимые источники этого загрязнения для разных пунктов в разные сезоны в отношении разных примесей.
- Впервые показано, что в среднем за год процесс выноса антропогенных примесей воздушными массами за пределы Арктики по эффективности очищения арктической атмосферы сравним с процессами, осаждающими примеси на подстилающую поверхность внутри региона, и изучены сезонные вариации в соотношении этих процессов.
- Впервые выполнены оценки средних многолетних значений (и их сезонных вариаций) атмосферных концентраций и потоков на подстилающую поверхность в Российской Арктике ряда антропогенных микроэлементов, являющихся приоритетными для изучения с точки зрения их негативного воздействия на окружающую среду и человека.
- Показано, что роль атмосферных аэрозолей в загрязнении вод Северного Ледовитого океана антропогенными микроэлементами значительно выше, чем предполагалось ранее. В частности, в арктических морях России средний годовой вклад аэрозолей в содержание некоторых тяжелых металлов составляет до половины вклада речного стока.
- Изучены долговременные изменения в процессах воздухообмена в СПО в конце XX века, результатом которых были изменения в источниках и стоках антропогенных аэрозольных примесей в атмосфере Арктики, а также изменения средних атмосферных концентраций антропогенных микроэлементов и их потоков на подстилающую поверхность в арктическом регионе. Отмечено, что в условиях современного изменения климата в Северном полушарии возможное снижение роли атмосферы как канала поступления антропогенных примесей в Арктику должно привести к возрастанию вклада в этот процесс речного стока. Поэтому

му уменьшение антропогенной нагрузки на окружающую среду Арктики возможно лишь путем разработки, внедрения и реальной установки на промышленных предприятиях современных эффективных средств фильтрации и очистки продуктов, выбрасываемых в атмосферу и в водные объекты природной среды.

Возможные практические приложения результатов:

1. Полученные экспериментальные данные об элементном составе аэрозоля в атмосфере и оценки многолетних средних атмосферных концентраций и выпадений на поверхность антропогенных микроэлементов в Российской Арктике могут быть использованы при изучении условий существования и развития арктических экосистем, а также для верификации различных теоретических моделей и оценок.
2. Предложенный метод оценки потенциальной возможности конкретного промышленного региона влиять на состав атмосферы в Арктике дает перспективы для прогнозирования, сравнения и регулирования воздействия существующих и новых промышленных объектов на арктическую атмосферу.
3. Полученные количественные оценки роли воздушных потоков в загрязнении и очищении природной среды Арктики в разные сезоны могут использоваться при изучении антропогенного воздействия на экосистему Арктики и климатических последствий этого воздействия.

Публикации и апробация работы. По теме диссертации автором опубликовано 35 статей в отечественных и зарубежных научных журналах и еще около 30 тезисов докладов в трудах различных конференций и симпозиумов. Результаты работы неоднократно докладывались на семинарах лабораторий ААНИИ, ИО им. П.П. Ширшова РАН, НИФХИ им. Л.Я. Карпова, ИЭМ, ИФА им. А.М. Обухова РАН, а также на совещаниях и конференциях в нашей стране и за рубежом: на Европейской аэрозольной конференции в 1994 и 2001 гг., на 14-ой Международной конференции по нуклеации и атмосферным аэрозолям в 1996 г., на Российско - Германских совещаниях по проблемам моря Лаптевых в 1996 и 2000 гг., на Заседаниях Рабочей группы «Аэрозоли Сибири» в 1995, 1996 и 2000-2002 гг., на Российско - Норвежском совещании в Санкт-Петербурге в 1995 г., на Международной конференции «Физика атмосферного аэрозоля» (Москва, 1999 г.), на XIII Международной школе по морской геологии в 1999 г., на Международных совещаниях по взаимодействию между сушей и океаном в Российской Арктике (LOIRA) в Москве в 1999 и 2000 гг., на 6-ой конференции в рамках международного проекта по Глобальной атмосферной химии (IGAC) в Италии в 1999 г., на 2-ом Международном симпозиуме по загрязнению окружающей среды (в рамках проекта АМАР) в Финляндии в 2002 г., на заключительной научной конференции по проекту «Климатическая система Арктики» (ACSYS) в Санкт-Петербурге в 2003 г.

Личный вклад автора состоит (i) в постановке задачи и организации экспериментальных наблюдений за составом атмосферного аэрозоля в Российской Арктике во второй половине 1980-х годов, (ii) в проектировании высокообъемного пробоотборника для сбора аэрозольных проб в Арктике, (iii) в обработке и интер-

претации экспериментальных результатов, полученных в ходе всех экспедиций, (iv) в создании, разработке и реализации методики оценки средних характеристик аэрозольного загрязнения арктической атмосферы на базе анализа многолетних массивов траекторий переноса воздушных масс. При выполнении модельной части работы автор дважды была руководителем инициативных проектов, поддержанных РФФИ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, и заключения, список цитируемой литературы содержит около 200 наименований плюс 35 статей автора. Объем диссертации 217 страниц, включающих 63 рисунка, 48 таблиц и библиографию на 12 страницах.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

В первой главе обсуждаются естественные геофизические процессы, происходящие в атмосфере северной полярной области земного шара, с точки зрения их влияния на дальний перенос аэрозольного вещества воздушными потоками, а также на накопление примесей в арктической атмосфере и ее очищение. Вторая половина главы посвящена обзору имеющихся экспериментальных данных об элементном составе арктического аэрозоля, его свойствах, сезонных и долговременных изменениях. Особое внимание уделяется результатам определения природы и источников различных химических элементов в атмосферном аэрозоле, а также влиянию его антропогенных составляющих (при осаждении на подстилающую поверхность) на окружающую среду в Арктике. Основные результаты этой части работы опубликованы автором в обзорах [3, 5, 22].

Анализ свойств арктической атмосферы (раздел 1.1) показал, что освещенность и температурный режим тропосферы, положение арктического фронта, приземные инверсии температуры, качество подстилающей поверхности, количество и качество осадков, особенности формирования облачности, – все эти факторы изменяются в течение года таким образом, что способствуют, с одной стороны, дальнему переносу загрязнений в Арктику и накоплению их там зимой и весной, и, с другой стороны, эффективному осаждению примесей из атмосферы на подстилающую поверхность в теплое время года. Именно эти естественные причины качественно определяют сезонный ход уровня загрязненности арктической атмосферы, характеризующийся максимумом в зимне-весеннее время года и минимумом летом (рис. 1). В результате совместного влияния особенностей народонаселения материков вокруг СЛО и геофизических характеристик атмосферы СПО, чаще и больше атмосферных загрязнений поступает в Арктику из Евразии, чем с американского материка.

В разделе 1.2 обсуждается экспериментальный материал о составе атмосферы Арктики, накопленный за последние десятилетия, главным образом, в ее зарубежной части. Приведенные данные указывают на сложность и многообразие процессов, формирующих состав арктического аэрозоля. Понимание этих явлений в полном объеме невозможно без накопления и обобщения аналогичных экспериментальных результатов для Российской территории Арктики.

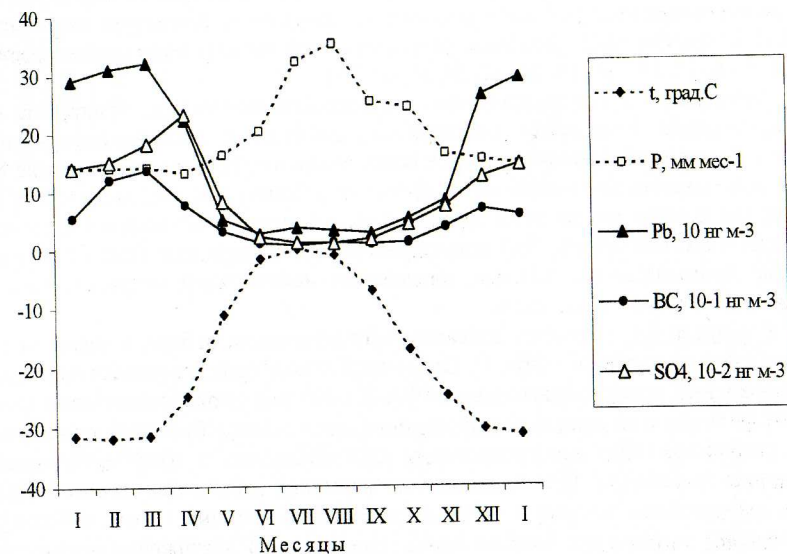


Рис. 1. Сезонные изменения температуры воздуха (t) [Радионов и др., 1996], количества осадков (P) [Брызгин, 1998] и концентраций свинца (Pb), сажи (BC) и сульфатов (SO₄) [Bartie, 1996] в атмосфере Арктики.

Раздел 1.3 содержит сведения об источниках антропогенных микроэлементов, их географическом положении, мощностях и составе эмиссии, о долговременных тенденциях изменений характеристик их выбросов.

В разделе 1.4 обсуждается разнообразное влияние атмосферных аэрозолей на формирование окружающей среды в Арктике. Осаждаясь из атмосферы на поверхность, аэрозоли попадают, главным образом, на лед, который перераспределяет их по всему пространству Северного Ледовитого океана, а также на другие природные объекты – воду, почву, растения и др. Воздействие аэрозолей на эти объекты в значительной мере определяется формой осадков, в которых они выпадают, и способностью аэрозольных составляющих взаимодействовать с природной средой в смысле физических, химических и биологических преобразований. Последняя зависит от условий окружающей среды, от температуры, освещенности, наличия тех или иных катализаторов различных процессов и т.д. При этом в холодных условиях Арктики целый ряд элементов окружающей среды (морской лед, донные осадки, мхи и лишайники, некоторые животные) обладают свойством накапливать загрязнения в течение многих лет. В результате антропогенная нагрузка на арктические экосистемы возрастает со временем.

Вторая глава содержит результаты экспериментальных исследований элементного состава аэрозоля в Российской Арктике, в которых автор принимала участие совместно с сотрудниками Института физики атмосферы им. А.М. Обухова

РАН, Арктического и Антарктического научно-исследовательского института, Института экспериментальной метеорологии (г. Обнинск) и Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН. Основные результаты этой части работы опубликованы в [1, 2, 4, 6 - 8, 11, 14 - 16, 19, 20, 22, 24, 31, 34, 35].

Цели наших экспериментальных исследований можно сформулировать следующим образом: (i) получить сведения об элементном составе атмосферного аэрозоля в Российской Арктике, которые совершенно отсутствовали в середине 80-х годов, при максимально возможном количестве рассматриваемых химических элементов; (ii) попытаться по этим данным выявить природу изучаемого аэрозоля и его отдельных компонент; (iii) идентифицировать конкретные более или менее крупные промышленные регионы, являвшиеся источниками антропогенных составляющих изучаемого аэрозоля.

В разделе 2.1. подробно описаны периоды и места отбора, а также методы анализа аэрозольных проб (табл. 1). Отбор проб атмосферного аэрозоля проводился на стандартные ацетатцеллюлозные (АФА-ХА-20) или перхлорвиниловые (АФА-ХП-20) фильтры с помощью разработанного нами высокообъемного прокачивающего устройства. При конструировании пробоотборника к нему предъявлялись следующие требования: 1) возможность непрерывной работы при низких температурах окружающего воздуха в течение длительного времени (месяц и более); 2) минимальное загрязнение воздуха самим прибором; 3) достижение оптимальной скорости прокачки воздуха с точки зрения минимизации ошибок, возникающих при определении количества того или иного элемента (из-за проскока аэрозольных частиц сквозь фильтр при большой скорости потока), а также ошибок идентификации происхождения аэрозоля из-за наложения различных воздушных масс (при длительной экспозиции фильтра с малой скоростью потока).

В стационарных пунктах (на островах Российской Арктики) воздухозабор осуществлялся на высоте 1.5- 2 м от поверхности земли. В морских экспедициях пробоотборник помещался на пеленгаторной палубе (около 8 – 12 м от поверхности воды), и работы по отбору проб проводились только во время движения судна и при встречном ветре, чтобы избежать попадания на фильтр загрязнений от самого судна. Длительность отбора одной пробы составляла от 1 до 5-7 суток, а объем прокачанного через фильтр воздуха для одной пробы – от 150 до 1000 м³. Время прокачки воздуха через один фильтр зависело от места, сезона и метеоусловий.

Основным методом определения элементного состава аэрозольных проб на фильтрах АФА-ХА-20 (табл. 1) был метод инструментального нейтронно-активационного анализа [Smakhtin et al., 1991], проводимый по методикам, используемым в Институте ядерной физики АН Узбекской ССР (пробы 1985 г.), в Филиале Научно-исследовательского физико-химического института им. Л.Я. Карпова (пробы 1986, 1988, 1989 и 1993 гг.) и в Институте геохимии и аналитической химии РАН (пробы 1994 и 1995 гг.). Пробы на фильтрах АФА-ХП-20 анализировались методом количественного спектрального анализа в Институте минералогии, кристаллографии и геологии редких элементов (ИМКГРЭ). Также применялись методы атомно-абсорбционной спектроскопии на приборе "Perkin- Elmer3030" и рентгено-флуоресцентного анализа.

Таблица 1. Периоды, места отбора и методы анализа аэрозольных проб (наши эксперименты в Российской Арктике).

Место	Координаты	Год	Месяцы	Число проб	Методы анализа
Арх. Северная Земля (СЗ)	79°30'N, 95°24'E	1985	Апрель	7	ИНАА
		1986	Май	7	КСА
		1988	Апрель-май	8	ИНАА
Остров Врангеля (ВР)	70°59'N, 178°30'W	1985	Май	7	ИНАА
		1986	Май-июнь	12	ИНАА
		1987	Апрель-май	13	ИНАА, КСА
		1988	Апрель-май	7	ИНАА
		1989	Апрель-май	13	ИНАА
Станция «Северный Полнос – 28» (СП – 28)	от 81°43'N до 82°05'N, от 167°33'E до 169°18'E	1987	Апрель-май	15	КСА
Арх. Земля Франца Иосифа (ЗФИ)	81°04'N, 56°18'E	1994	Март-апрель	10	ИНАА, РФА
Баренцево море		1994	Август-сентябрь	10	ИНАА, ААС
Море Лаптевых		1995	Июль-сентябрь	12	ИНАА, РФА
Всего 12 экспедиций, 122 пробы аэрозоля					

*ИНАА – инструментальный нейтронно-активационный анализ, КСА – количественный спектральный анализ, РФА – рентгено-флуоресцентный анализ, ААС – атомно-абсорбционный анализ.

В разделе 2.2 описываются методы анализа полученных данных об элементном составе аэрозольных проб. Грубое представление о пространственном происхождении изучаемого аэрозоля и возможном влиянии на его состав тех или иных природных и/или антропогенных источников дают траектории переноса воздушных масс в пункт наблюдений для периода отбора проб. Такой синоптический анализ является неотъемлемой частью современных исследований состава приземного слоя земной атмосферы. Однако нужно очень осторожно подходить к выводам, сделанным на основе сопоставления состава аэрозоля с отдельными траекториями, поскольку при модельных расчетах последних возможны существенные ошибки, связанные с пространственной и временной перестройкой циркуляционных процессов в атмосфере, а также с недостаточностью информации о метеорологических и синоптических процессах по пути следования воздушной массы [Kahl et al., 1989].

Для выявления групп элементов, сосредоточенных на аэрозольных частицах, имеющих общее физическое и/или пространственное происхождение, обычно применяют такие статистические методы, как (i) расчет коэффициентов корреляции между концентрациями или коэффициентами обогащения пар элементов в разных пробах и (ii) факторный анализ больших массивов данных о составе аэрозоля. Корреляционные методы позволяют проанализировать временную изменчивость состава аэрозоля, в результате чего обнаруживается общность происхождения групп элементов, концентрации которых изменяются синхронно. Однако реальные причины этого остаются за рамками такого анализа. В результате чаще всего достижима достаточно грубая, но полезная качественная классификация химических элементов по происхождению аэрозольных частиц, на которых они преимущественно сосредоточены в изучаемом воздухе, а также усредненная оценка влияния регионов-источников, природных факторов и т.д.

Для идентификации источников антропогенных составляющих аэрозоля удаленных районов во многих экспериментальных работах используется специальный метод сравнения отношений концентраций так называемых элементов-трассеров в отдельной пробе и в атмосферных выбросах промышленных регионов-источников, предложенный в [Rahn and Lowenthal, 1984]. Основные ограничения этого метода связаны, в первую очередь, с недостаточностью и невысокой степенью надежности информации о составе и мощностях выбросов примесей в атмосферу промышленными регионами, а также с многообразием и сложностью учета процессов, воздействующих на аэрозольные частицы при их дальнем переносе в атмосфере.

Учитывая, что ряды наших экспериментальных данных в каждой экспедиции невелики (табл. 1), для повышения надежности выводов о природе и происхождении исследуемого аэрозоля и его составляющих использовались параллельно несколько из перечисленных выше методов обработки результатов.

В разделах 2.2 – 2.5 обсуждаются основные результаты анализа нашего экспериментального материала. В табл. 2 приведены средние значения концентраций ряда микроэлементов в атмосферном аэрозоле во время проведения отдельных экс

Таблица 2. Средние концентрации химических элементов в атмосфере Российской Арктики во время наблюдений (табл. 1), нг м^{-3} .

Элемент	Места отбора проб					
	СЗ	ВР	СП-28	ЗФИ	Баренцево море	Море Лаптевых
	Весна				Лето-осень	
Na	94	240	420	390	1770	490
Mg	94	430	640	700	-	-
Cl	22	320	-	410	-	-
Ca	180	600	250	290	300	-
Br	4.3	11	-	-	0.1	1.7
Sr	0.37	-	-	-	-	-
I	1.2	1.8	-	-	-	-
Se	0.30	0.32	-	-	-	-
Al	81	360	540	310	-	-
Si	580	550	220	-	-	-
Sc	0.014	0.11	-	-	0.0035	0.0081
Ti	16	21	17	5.1	-	-
Fe	31	160	180	19	150	140
Co	0.08	0.49	-	-	0.44	0.10
Sm	0.010	0.22	-	-	0.0092	-
Cs	-	-	-	-	0.016	-
La	-	-	-	-	0.065	-
Ce	-	-	-	-	0.113	-
Nd	-	-	-	-	0.037	-
Eu	-	-	-	-	0.0022	-
Th	0.018	0.54	-	-	-	-
Te	0.105	-	-	-	-	-
Hf	0.064	0.12	-	-	-	-
V	0.75	0.86	1.0	0.7	-	-
Cr	1.6	4.5	4.6	-	5.9	4.0
Mn	1.4	3.8	5.0	2.6	-	-
Ni	6.1	8.1	2.2	-	10.0	-
Cu	3.8	6.4	7.0	26	0.11	-
Zn	5.8	16	14	5.2	45	15.4
As	1.8	0.8	-	-	0.15	0.38
Mo	0.74	1.2	-	-	-	-
Ag	1.4	0.52	0.10	-	-	-
Cd	0.09	0.59	0.34	-	-	-
Sb	0.19	0.19	-	-	0.067	-
Au	0.062	0.010	-	-	-	-
Pb	3.5	10	13	44	-	-

педиций. Средние квадратичные отклонения составляли 50-100 % от средней величины. Как показано в материалах диссертации, эти результаты вполне удовлетворительно соответствуют аналогичным экспериментальным данным, полученным исследователями в других районах Арктики.

В результате в аэрозоле, собранном на островах, парный корреляционный анализ лишь очень грубо выделяет элементы, сосредоточенные преимущественно на частицах терригенного (Si, Sc, Ti, Al, Sm, редкоземельные элементы) или морского (Na, Br) происхождения. Для морских аэрозолей по результатам такого анализа был сделан вывод о том, что некоторые элементы сосредоточены на частицах различного происхождения: терригенные + морские (Ca), терригенные + антропогенные (Co, Fe, Au), антропогенные + морские (Ni), терригенные + морские + антропогенные (Zn, Cr).

Факторный анализ концентраций 10 элементов по данным четырех экспедиций (1985 и 1988 гг.) на Северной Земле и на о. Врангеля позволил получить для этой части данных информацию об антропогенном загрязнении изучаемого аэрозоля. Были выделены 4 группы элементов, связанных с терригенными (Fe, Al, Mn), морскими (Na, Cl, Br) и антропогенными (двух типов) частицами. Происхождение последних можно связать с работой ТЭЦ (Co, Sb) и предприятий металлургических производств (Sb, Zn) [Остроумовский и Петрухин, 1984].

Отдельно следует рассматривать пробы аэрозоля, собранные на дрейфующей станции СП-28. Дрейф льдов в Арктике в большой степени определяется пространственным распределением приземного поля атмосферного давления и, соответственно, приземных воздушных потоков [Serreze et al., 1993]. Станция СП-28 весной 1989 г. находилась в Тихоокеанском секторе Арктики, где располагался мощный антициклон, вызывавший перемешивание арктического воздуха над огромной территорией СЛО от Северного полюса до Берингова пролива. В этом случае рассматриваемый пункт наблюдений был изолирован от прямых заносов воздуха и загрязнений из среднеширотных районов. При этом парный корреляционный анализ выделяет лишь морские элементы, и средний состав атмосферного аэрозоля, собранного в этой экспедиции, характеризует фоновый весенний арктический аэрозоль, состав которого сформировался в тихоокеанском секторе Арктики в 1987 г. в результате достаточно долгого перемешивания воздуха в пределах арктического региона.

Применяя одновременно методику сравнения отношений концентраций элементов-трассеров (As, V, Mn, Sb, Pb, Se, Zn, Cd и др.) и анализ путей переноса воздушных масс к пунктам наблюдений, удалось идентифицировать промышленные области, являвшиеся источниками антропогенных компонент в 8 аэрозольных пробах, собранных на арх. Северная Земля, и в 5 пробах с о. Врангеля. Это были развитые индустриальные регионы, расположенные в Западной и Восточной Европе, на Кольском п-ове, в районе Норильска, в Японии и в Северной Америке.

Таким образом, наши результаты позволяют расширить на весь арктический регион основные качественные выводы о составе и свойствах арктического аэрозоля, сделанные в главе 1 по данным зарубежных авторов: 1) арктический аэрозоль содержит составляющие различной природы, количественное соотношение между

которыми зависит от времени года и места наблюдений; 2) зимой и весной пространственное распределение антропогенных компонент аэрозоля в арктической атмосфере достаточно однородно и их содержание на порядок и более превышает летние значения; 3) межгодовая изменчивость состава арктического аэрозоля очень велика; 4) антропогенные составляющие чаще поступают в атмосферу Арктики с территории Евразии, чем из Северной Америки.

Подчеркнем, что экспериментальное изучение свойств и состава атмосферного аэрозоля в Арктике, несмотря на свою продолжительность и, в некоторых пунктах, непрерывность, дает лишь фрагментарную (если не во времени, то в пространстве) информацию. Кроме того, многообразие задач, поставленных разными исследователями, а значит, и примененных ими методик, обуславливает огромное разнообразие экспериментальных результатов, сравнение и обобщение которых не всегда возможно. Поэтому в качестве альтернативного подхода к решению задачи выявления закономерностей в процессах формирования антропогенной примеси в атмосфере Арктики и оценки среднего ее концентрации предлагается анализ многолетней синоптической и метеорологической информации в совокупности с модельными оценками атмосферного переноса примесей в СПО. Результаты такого подхода и сопоставление их с экспериментальными данными представлены в следующих главах диссертации.

Третья глава посвящена изучению средних характеристик, свойственных процессам дальнего переноса воздушных масс в Российскую Арктику и из нее, на протяжении 10-лет с 1986 по 1995 г. Выбор этого периода определялся, с одной стороны, сроками наших экспериментальных работ в Арктике, а с другой стороны, чисто техническими возможностями вычислительной базы. Нами анализировались пространственные и временные закономерности в процессах воздухообмена между Российской территорией Арктики и средними широтами, а также межгодовые и сезонные особенности этих процессов. Основные результаты этой части работы опубликованы в [9, 10, 13, 17, 21, 27, 28].

В **разделе 3.1** ставится задача, и обсуждаются основные подходы к ее решению. «Пунктами наблюдений», для которых рассчитывались траектории переноса воздушных масс, были выбраны три географические точки (табл. 1), расположенные приблизительно там же, где реально проводились экспериментальные работы по изучению состава атмосферного аэрозоля на островах Российской Арктики, – на Земле Франца Иосифа (ЗФИ), на арх. Северная Земля (СЗ) и на о. Врангеля (ВР). Кроме того, отдельная дополнительная работа была выполнена для географической точки с координатами 77°N, 125°E, расположенной приблизительно в центре моря Лаптевых. Для каждого из этих пунктов рассчитывались 5-суточные прямые (воздух уходит от пункта наблюдений) и обратные (воздух приходит к пункту наблюдений) траектории движения воздуха, рассчитанные на 0 часов Гринвичского времени на изобарических поверхностях 925, 850, и 700 гПа. Координаты положения воздушной массы вычислялись с интервалом 6 часов для каждого дня января, апреля, июля и октября. Траектории рассчитывались в Гидрометцентре России с помощью программного комплекса «Расчет траекторий движения воздушных час-

В четвертой главе описывается предложенный нами подход к оценке эффективности переноса примеси в атмосфере при статистической обработке большого количества траекторий движения воздушных масс и результаты его применения для оценки средних атмосферных концентраций и выпадений на подстилающую поверхность конкретных антропогенных микроэлементов в Арктике. Основные результаты исследований, составившие материал данной главы, опубликованы в [10, 12, 13, 18, 21, 23, 25 - 31, 34, 35].

Подчеркнем, что все наши дальнейшие рассуждения и расчеты относятся к атмосферной примеси, которая консервативна (пассивна) по отношению к химическим преобразованиям в воздухе во время переноса, или к отдельным микроэлементам, методы регистрации которых позволяют идентифицировать их вне зависимости от конкретного химического состава аэрозольного вещества.

Методические аспекты обсуждаются в разделе 4.1. В отличие от работ [Rasuna et al. 1985; Akeredolu et al. 1994; Гальперин и др. 1995], где при расчете дальнего переноса примеси в атмосфере проводилось ее интегрирование (с учетом поступлений и потерь) вдоль каждой конкретной траектории распространения воздуха к пункту наблюдений, мы использовали усредненные характеристики групп траекторий, по которым воздушные массы переносились от каждого региона-источника к пункту наблюдений. Предполагалось, что по мере движения между источником и пунктом наблюдений примесь в воздушный поток больше не добавляется, а ее потери обусловлены процессами осаждения на поверхность. Последние характеризуются скоростями сухого осаждения и осаждения осадками, выбор которых основывался на литературных данных о величинах этих параметров с учетом многолетних средних закономерностей сезонных и пространственных изменений ряда метеорологических характеристик арктической атмосферы. Такой подход не нуждается в многочисленных метеорологических данных для конкретных дней и территорий, необходимых при расчетах вдоль каждой траектории, что упростило вычисления и сократило их время. Кроме того, он позволяет оценить средние вклады отдельных промышленных регионов в загрязнение атмосферы Российской Арктики, что повышает наглядность и практическую значимость получаемых результатов.

Уравнение баланса массы, описывающее изменение концентрации примеси при ее движении в воздушном потоке, выглядит следующим образом:

$$dC/dt = (1-\alpha) Q/H - KC/H, \quad (1)$$

где C – концентрация примеси в воздухе; t – текущее время; Q – мощность эмиссии примеси с единицы площади в единицу времени; H – высота слоя перемешивания; α – доля примеси, оседающая на землю вблизи источника; K – скорость выведения примеси из воздушного потока. Последний параметр определяется сухим осаждением примеси на поверхность и ее осаждением осадками и может быть представлен в виде суммы соответствующих обобщенных скоростей:

$$K = k_d + WP, \quad (2)$$

где k_d – скорость сухого осаждения; W – эффективность захвата примеси осадками (washout ratio); P – количество осадков в единицу времени.

Из уравнения (1) для каждого источника в отдельности следует, что концентрация $C_{ij}(X)$ примеси X , создаваемая источником i в пункте j , может быть представлена в виде:

$$C_{ij}(X) = Q_i(X) (1 - \alpha) Z_{ij}(X), \quad (3)$$

где функция $Z_{ij}(X)$, названная нами функцией эффективности переноса (ФЭП), характеризует все атмосферные процессы, определяющие перенос примеси X от источника i к пункту j . ФЭП зависит от вероятности и скорости движения воздуха между этими пунктами, а также от условий вертикального перемешивания и скорости выведения примеси из атмосферы во время переноса.

В арктической атмосфере почти все время и почти повсеместно наблюдаются приземные и/или приподнятые инверсии температуры [Бурова, 1981; Нагурный и др., 1991], затрудняющие вертикальный воздухообмен в самом нижнем слое тропосферы. Мы попытались учесть эти две ситуации, представляя ФЭП в виде двух слагаемых, одно из которых описывает процесс распространения примеси над инверсионным слоем (приземная инверсия), а другое – под слоем приподнятой инверсии, с весовыми коэффициентами, равными средним вероятностям этих ситуаций в соответствующем пункте и сезоне.

Значения скоростей сухого осаждения примеси для разных сезонов выбирались по имеющимся экспериментальным данным, а скорости осаждения осадками рассчитывались по многолетним данным об осадках из [Брызгин, 1998]. Результирующая скорость осаждения на поверхность K рассчитывалась по формуле (2) и считалась постоянной для каждого сезона и пункта. Она предполагалась также одинаковой для всех рассматриваемых примесей и неизменной по мере переноса примеси к пункту наблюдений. Таким образом, все дальнейшие результаты справедливы для примесей, для которых величины скорости осаждения на поверхность в разные сезоны соответствуют следующим интервалам: зимой 0.05–0.07, весной 0.1–0.2, летом 0.9–1.2, осенью 0.4–0.8 см с⁻¹.

В рамках предложенного подхода по величине ФЭП можно, не конкретизируя сами антропогенные составляющие аэрозоля, оценить потенциальные возможности того или иного региона-источника оказать воздействие на состав атмосферы в рассматриваемых пунктах. На рис. 2 показаны все крупные промышленные области Северного полушария, которые рассматривались в качестве потенциальных регионов-источников загрязнений атмосферы в пунктах наблюдений. Значения ФЭП примеси от них в разные сезоны приведены на рис. 3. Подчеркнем, что величина ФЭП характеризует лишь возможность каждого источника внести загрязнения в атмосферу вблизи соответствующего пункта. Вклады же этих источников в концентрацию конкретной примеси в атмосфере пункта наблюдений определяются по формуле (3) с использованием данных об атмосферных выбросах Q_i этих примесей в рассматриваемых регионах.

При нашей постановке задачи, рассматривая процесс перераспределения

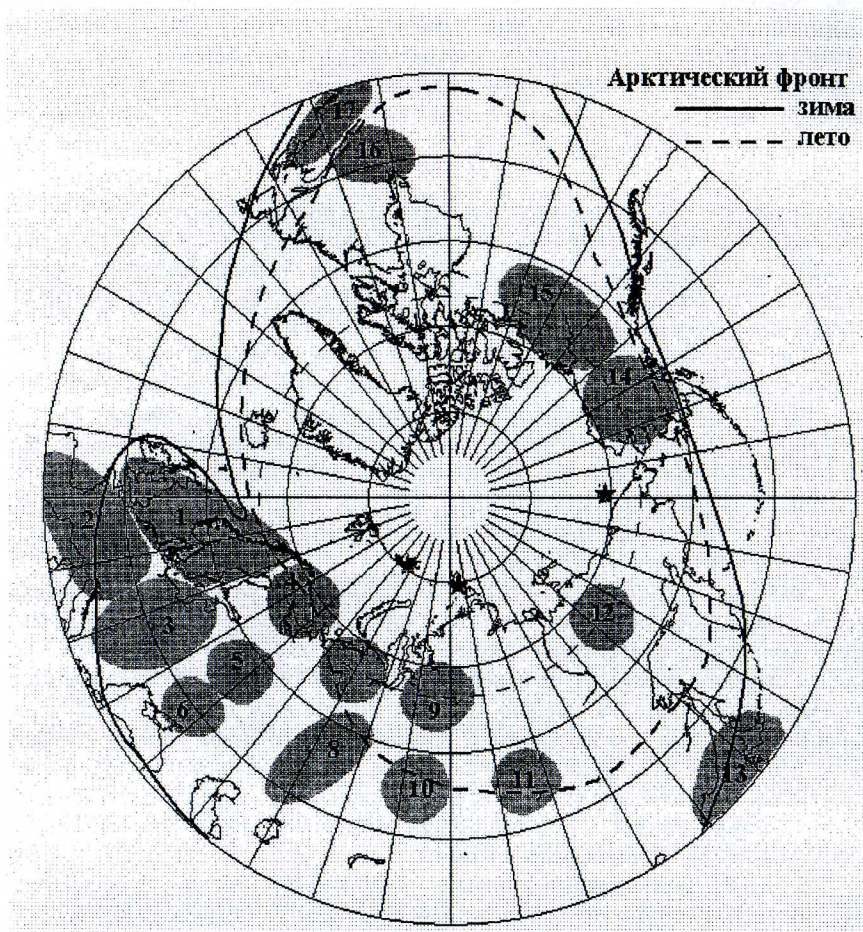


Рис. 2. Схема расположения пунктов наблюдений (звездочки) и регионов-источников: 1 – Северная Европа, 2 – Западная Европа, 3 – Центральная Европа, 4 – Кольский п-ов, 5 – центр европейской территории СССР (ЦЕТС), 6 – Донбасс, 7 – Печорский бассейн, 8 – Урал, 9 – район Норильска, 10 – Кузбасс, 11 – район Байкала, 12 – Якутия, 13 – Япония, 14 – Аляска, 15 – Канада, 16 – район Сэдбери, 17 – восточное побережье США.

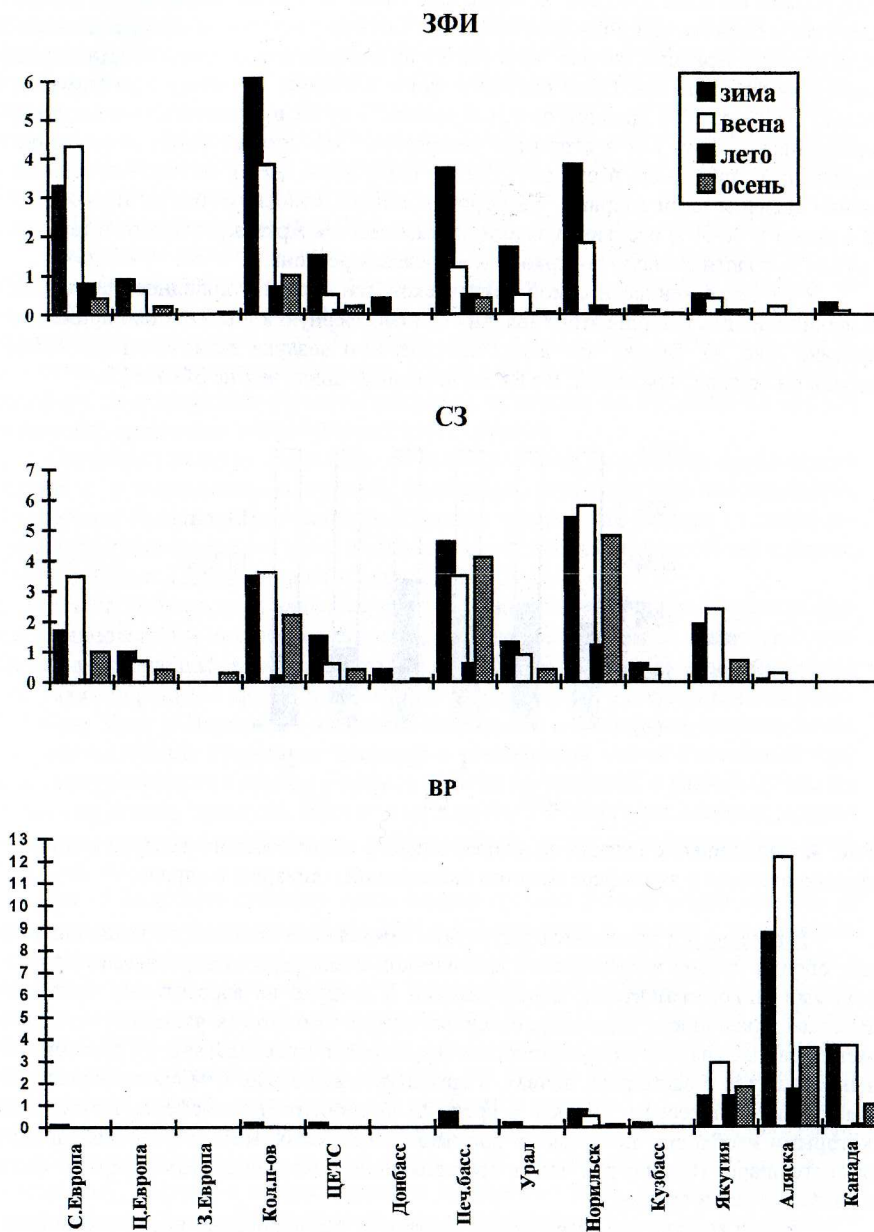


Рис. 3. Значения ФЭП от разных регионов-источников в разные сезоны, усл.ед.

воздушными массами примеси, которую они уносят от пункта наблюдений, можно выделить и оценить три доли этой примеси. Часть ее унесется воздушными массами за пределы Арктики, вторая часть осядет на поверхность, а третья – останется в воздухе внутри региона. Нами показано, что в холодную половину года (зимой и весной) от 23 до 57% примеси остается дольше 5 суток в арктической атмосфере, перемешиваясь там, как в огромном резервуаре. Это явление ранее качественно описывалось, например, в обзорах [Baggie, 1986; Shaw, 1995], но количественные оценки сделаны нами впервые. Наоборот, в теплую половину года почти все (92-98% летом и 80-90% осенью) примеси, принесенные в Арктику, оседают в течение 5 суток на подстилающую поверхность в пределах региона.

Учет загрязненности самой арктической атмосферы в холодное время года позволил оценить влияние этого явления на атмосферную концентрацию примеси в Арктике (рис. 4). Видно, что вклад арктического воздуха значителен (до 50%). Весной он больше, чем зимой. На ВР он несколько ниже, чем на ЗФИ и СЗ.

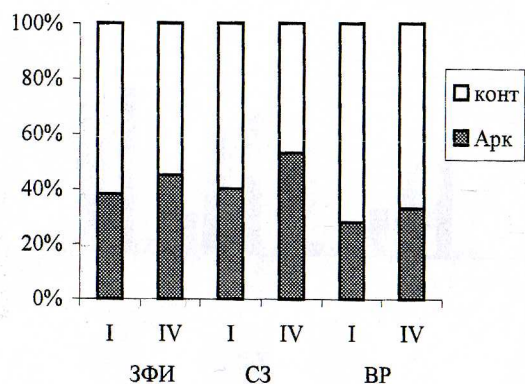


Рис. 4. Соотношение вкладов континентального и арктического воздуха в концентрацию примеси в атмосфере пунктов наблюдений в январе и в апреле.

В разделе 4.2 приводятся результаты применения описанного выше подхода для оценки уровня загрязненности арктической атмосферы конкретными антропогенными микроэлементами, переносимыми в воздухе на аэрозольных частицах. Высокая токсичность ряда антропогенных микроэлементов (в частности, тяжелых металлов), их участие в биохимических процессах и, как следствие, их способность накапливаться в растениях, почвах, в организмах животных и человека обуславливают особый интерес к ним как к вредным компонентам атмосферы, контроль за которыми необходим не только в промышленных зонах, но и в фоновых районах земного шара. Именно для таких составляющих арктической атмосферы и были проведены наши оценки.

Выбор конкретных химических элементов для апробации предложенной методики оценок был основан на следующих критериях: 1) наличие для этих элементов сведений о мощностях эмиссии и скоростях осаждения на поверхность, обеспе-

чивающее проведение расчетов; 2) наличие экспериментальных данных об атмосферных концентрациях и выпадениях этих примесей в Арктике, дающее возможность верификации и демонстрации качества предлагаемого подхода; 3) выбранные элементы должны, с одной стороны, быть индикаторами различных производственных процессов и/или предприятий, а с другой стороны, оказывать негативное воздействие на окружающую среду и человека, обеспечивая тем самым не только чисто научную, но и практическую ценность получаемых результатов. Всем этим требованиям удовлетворяют следующие шесть микроэлементов – мышьяк (As), никель (Ni), свинец (Pb), ванадий (V), цинк (Zn) и кадмий (Cd).

Отсутствие достаточно полных данных о составе и мощностях атмосферных выбросов промышленными районами, расположенными в Северной Америке, не позволило провести расчеты для ВР, где ФЭП максимальна именно для американских регионов-источников (рис. 3). Можно лишь сделать вывод, что в среднем во все сезоны вклад североамериканских источников антропогенных загрязнений в атмосферу тихоокеанского сектора Арктики (в частности, на ВР) является определяющим (по сравнению с евразийскими источниками).

Сравнение вкладов отдельных регионов-источников в состав арктического аэрозоля в рассматриваемых пунктах показывает, что источник максимального вклада может быть не самым мощным. Влияние конкретного региона на состав аэрозоля в Арктике зависит от того, в какое время года рассматривается это влияние, в каком пункте и в отношении какой примеси.

В табл. 3 приведены наиболее значимые регионы-источники (характеризующиеся наибольшими вкладами в концентрации рассматриваемых химических элементов) в отношении загрязнения атмосферы вблизи ЗФИ и СЗ в разные сезоны года. Таким образом, 4 крупных промышленных региона – Северная Европа, Кольский п-ов, Урал и Норильск – являются основными источниками антропогенных микроэлементов для атмосферы западной и центральной частей Российской Арктики, конкурируя друг с другом в разных пунктах наблюдений, в разные сезоны и в отношении разных примесей. Кроме того, в холодное полугодие мощным аккумулятором и вторичным источником загрязнений является сама арктическая атмосфера (рис. 4).

Рис. 5 позволяет сравнить наши оценки средних концентраций каждого из шести микроэлементов в атмосфере ЗФИ и СЗ для разных сезонов с экспериментальными результатами многолетних измерений концентраций тех же элементов в Канадской Арктике, полученными при усреднении еженедельных данных об элементном составе приземного аэрозоля в течение 15 лет (с 1981 по 1995 гг.) [Sirois and Baggie, 1999]. Видно, что расчетные (для Российской Арктики) и экспериментальные (для Канадской Арктики) значения для свинца и ванадия соответствуют даже слишком хорошо, а для цинка они расходятся примерно в 5-6 раз. Соответствие наших оценок экспериментальным данным, полученным на Шпицбергене в течение 1995 г., также вполне удовлетворительное. Значительные различия для Zn, по-видимому, связаны с неадекватностью выбранного нами описания источников этого элемента. Возможны, например, следующие варианты: 1) мы использовали заниженные значения мощностей выбросов цинка регионами-источниками; 2) в С.

Америке существуют мощные источники цинка, дающие вклад в концентрацию этого элемента в атмосфере Канадской Арктики; 3) в арктической атмосфере существует значительная доля цинка естественного происхождения. В разные сезоны эти и другие причины могут иметь большее или меньшее значение.

Таблица 3. Регионы-источники шести антропогенных микроэлементов, вносящие наибольшие вклады (в скобках – % от средней концентрации элемента) в загрязненные атмосферы на ЗФИ и СЗ в разные сезоны.

Пункт	Сезон	As, Ni	Pb, V	Zn, Cd
Арх. Земля Франца Иосифа	Зима	Кол. п-ов (16) Урал (15) Норильск (15)	Урал (22) Сев. Европа (16)	Сев. Европа (22) Урал (18)
	Весна	Сев. Европа (16) Кол. п-ов (15) Норильск (11)	Сев. Европа (30) Урал (11)	Сев. Европа (30) Кол. п-ов (10)
	Лето	Кол. п-ов (45) Сев. Европа (36) Норильск (12)	Сев. Европа (76) Кол. п-ов (11)	Сев. Европа (81) Кол. п-ов (12)
	Осень	Кол. п-ов (50) Сев. Европа (14) ЦЕТС (10) Норильск (9)	Сев. Европа (38) Кол. п-ов (17) Ц. Европа (14) Урал (13) Зап. Европа (10)	Сев. Европа (37) Кол. п-ов (17) Ц. Европа (15) Зап. Европа (10) Кузбасс (9)
Арх. Северная Земля	Зима	Норильск (25) Урал (12) Кол. п-ов (11)	Урал (23) Сев. Европа (10) ЦЕТС (8)	Урал (15) Кузбасс (14) Сев. Европа (11)
	Весна	Норильск (22) Кол. п-ов (9)	Сев. Европа (18) Урал (13)	Сев. Европа (20) Урал (8) Кузбасс (8)
	Лето	Норильск (83) Кол. п-ов (9)	Норильск (51) Урал (15) Сев. Европа (13) Кол. п-ов (9)	Норильск (58) Сев. Европа (21) Урал (9) Кол. п-ов (9)
	Осень	Норильск (57) Кол. п-ов (18)	Урал (22) Сев. Европа (20) Норильск (17) Зап. Европа (16)	Сев. Европа (23) Норильск (21) Зап. Европа (18) Урал (14)

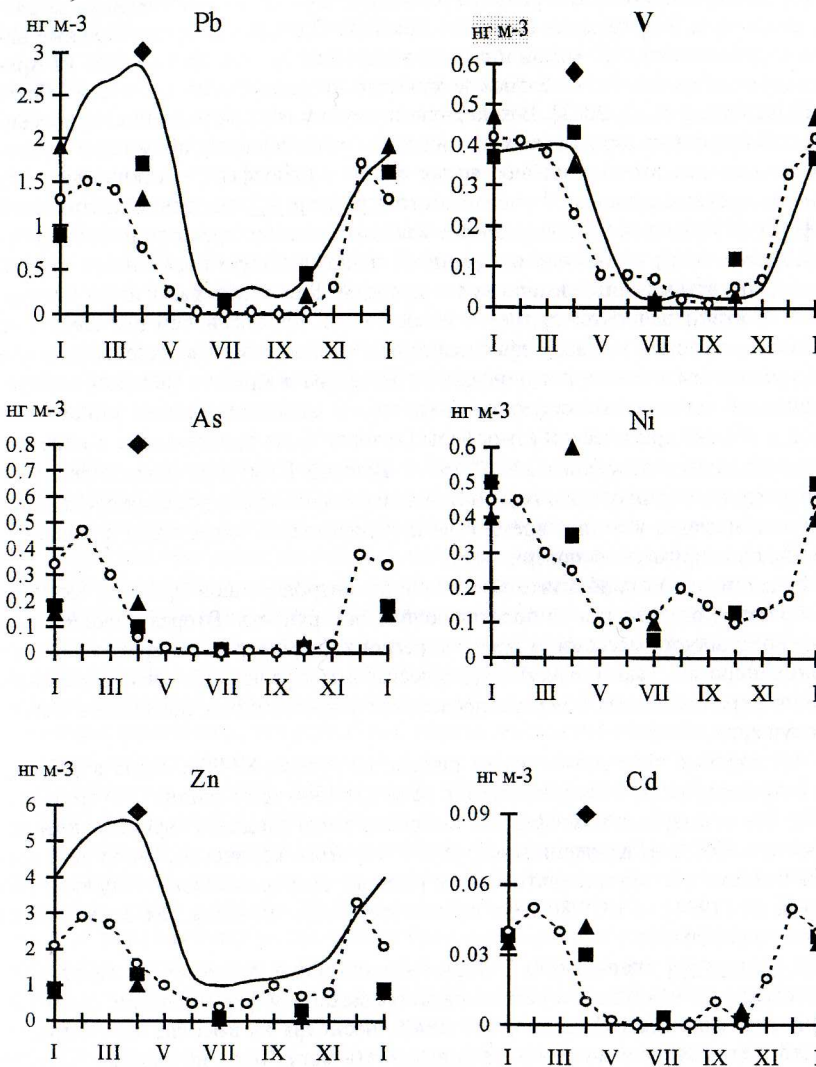


Рис. 5. Сезонные изменения средней концентрации элементов в атмосфере ЗФИ (треугольники) и СЗ (квадраты) в сравнении с экспериментальными данными для Канадской Арктики (сплошная линия) [Sirois and Barrie, 1999], Шпицбергена (кружки) [Berg et al., 1996] и Северной Земли (ромб) [7].

тищ», разработанного там же и адаптированного к соответствующей базе метеорологических данных [Белюсов и Пагава, 1998].

Длительность рассматриваемых траекторий обычно выбирается с учетом времени существования в атмосфере тех примесей, перенос которых представляет интерес для конкретного исследования. В холодную часть года время жизни антропогенных микроэлементов в арктической атмосфере может достигать 10-15 суток, а летом в 3-5 раз меньше. Требование однородности постановки и решения задачи для всех сезонов обусловило выбор для наших исследований 5-суточных траекторий. Тем более что неопределенность вычисления географического положения конца траектории тем больше, чем она длиннее, и уже для 5-суточной траектории эта неопределенность составляет около 1000 км [Kahl et al., 1989]. Незначительные изменения окончательных оценок, возникающие при увеличении длительности рассматриваемых траекторий до 8 суток, обсуждаются в разделе 4.5 диссертации.

При изучении сезонных вариаций характеристик переноса воздуха предполагалось, что выбранные месяцы являются представительными для соответствующих сезонов, и средние результаты для каждого месяца, полученные по исходным массивам траекторий, можно трактовать как средние сезонные характеристики изучаемых процессов.

Поскольку вся задача направлена на изучение атмосферного переноса примеси, именно это обстоятельство определяет в данном случае принципы классификации траекторий движения воздушных масс. Эффективность переноса примеси в нижних слоях тропосферы при прочих равных условиях непосредственно зависит от времени существования этой примеси в воздухе, которое, в свою очередь, зависит от характера подстилающей поверхности, над которой движется воздушная масса. При этом различия максимальны при переносе над снегом/льдом (время жизни примеси больше) или же над водой (время жизни меньше) [Бызова и др., 1991]. Поэтому при классификации обратных траекторий мы учитывали не только пространственное положение траектории (проходит ли она над океаном, материком, каким именно и т.д.), а также и то, над какой подстилающей поверхностью преимущественно движется воздушная масса по данной траектории. И в первую очередь, является ли эта поверхность преимущественно заснеженной/ледяной или, наоборот, водной.

В качестве крупных территорий, откуда воздух поступал к пунктам наблюдений, рассматривались Европа, Азия, Северная Америка, а также поверхности каждого из трех океанов (Атлантического, Северного Ледовитого и Тихого). В результате были выделены три основные группы обратных траекторий: (i) траектории, вдоль которых распространяется континентальный воздух, целиком расположенные над материками и Арктикой; (ii) траектории, вдоль которых распространяется морской воздух, расположенные хотя бы в течение 1 суток над открытой водной поверхностью, а далее до пункта наблюдений проходящие только над Арктикой; (iii) траектории, вдоль которых распространяется арктический воздух, целиком расположенные над Арктикой.

Здесь и в дальнейшем под термином «Арктика» мы подразумеваем территорию, расположенную севернее параллели 70°N, плюс остальную более южную часть Гренландии.

Классификация прямых траекторий осуществлялась по пространственному положению их наиболее южных точек, т.е. по тому, куда – на территории материков (отдельно Европа, Азия и Америка), Арктики или же Тихого/Атлантического океанов – уходят вдоль них воздушные массы и атмосферные примеси.

Средние закономерности в процессах воздухообмена Российской Арктики с окружающими территориями рассмотрены в разделе 3.2. За рассматриваемое десятилетие в процессах переноса воздушных масс в пункты наблюдений выделяются следующие основные черты: (а) доля арктического воздуха на ЗФИ и СЗ составляла в разные сезоны от 40 до 60%, а на ВР приблизительно вдвое меньше; (б) морской воздух (только из Атлантики) на ЗФИ составлял около 10% в течение всего года, на СЗ он был замечен только летом, а на ВР морской воздух – это воздух Тихого океана, и его вклад в разные сезоны был от 15 до 25%; (в) доля воздуха, приходящего с материков, в целом везде была высока (30-60% в течение года).

Сравнивая распределения обратных и прямых траекторий, отметим следующее: (а) воздух чаще уходит от пунктов наблюдений в Арктику (до 65% всех прямых траекторий), чем приходит из нее; (б) воздухообмен тихоокеанского сектора Арктики (ВР) с территорией американского материка достаточно эффективен (по сравнению с ЗФИ и СЗ) в обе стороны; (в) из Российской Арктики в целом воздух чаще уходит в Азию, чем в Европу; (г) от ЗФИ и СЗ воздух практически не уходит на территории океанов, тогда как от ВР это происходит в среднем в 20% случаев и только на территорию Тихого океана. Последнее обстоятельство особенно важно в холодную часть года (зимой и весной), когда арктический воздух загрязнен. В это время в зоне арктического фронта должно происходить эффективное вымывание этих загрязнений осадками на водную или ледяную поверхность в северной части Тихого океана.

Рассматривая отдельно прямые траектории, расположенные целиком над Арктикой, можно сделать вывод, что уже за 5 суток воздух внутри арктического региона успевает перемешиваться. В результате в холодные сезоны концентрации различных антропогенных микроэлементов, имеющих время жизни в арктической атмосфере более 5 суток, должны быть в среднем приблизительно одинаковы во всем воздушном бассейне Арктики, что отмечалось по экспериментальным данным в разделах 1.2 и 2.2.

Многообразие процессов циркуляции в СПО приводит к значительным пространственным, сезонным и межгодовым вариациям характеристик воздухообмена между районами Российской Арктики и окружающими территориями (раздел 3.3). В работе приведены сведения об аномальных (по сравнению со средними характеристиками) чертах в изучаемых процессах в разных районах Арктики в разные сезоны в период с 1986 по 1995 гг.. Эту межгодовую изменчивость необходимо учитывать при интерпретации и обобщении отдельных экспериментальных результатов, не подкрепленных многолетними наблюдениями.

До настоящего времени процесс распространения антропогенных примесей в атмосфере северных полярных районов рассматривался лишь как механизм загрязнения атмосферы и природных объектов Арктики. Однако экспериментальные наблюдения показывают, что зимой и весной воздушные массы, приходящие из Арктики, могут содержать значительное количество антропогенных примесей [Shaw, 1988; Neitzelbeug et al., 2003]. В холодную половину года загрязнения, принесенные на субмикронных аэрозольных частицах из промышленных областей в Арктику и имеющие достаточно большое время жизни в атмосфере, частично выхолот обратно за пределы региона. С учетом этого в разделе 4.3 описаны арктической атмосферы от примесей рассматриваются как совокупность трех процессов: (i) сухое осаждение и (ii) осаждение осадками на подстилающую поверхность внутри региона и (iii) атмосферный вынос за его пределы. Как показывают наши оценки, зимой из Арктики выносятся примерно вдвое больше примесей, чем там оседает на поверхность, а весной эти доли приблизительно равны. В теплые сезоны (летом и осенью) основным механизмом очищения атмосферы в Арктике является обновление примесей на подстилающую поверхность. В холодные сезоны обновление примеси в объеме арктической атмосферы (которая была представлена в виде цилиндра с площадью основания $23 \times 10^6 \text{ км}^2$ и высотой 1 км) в результате действия как вертикального (вниз), так и горизонтального механизмов очищения происходит 3-3,5 раза в месяц, а в теплые времена года приблизительно вдвое чаще и только за счет осаждения примеси на поверхность.

В целом за год приблизительно половина антропогенной примеси, занесенной в Арктику, оседает там на подстилающую поверхность. Вторая половина выносятся воздушными массами за пределы региона и оседает на поверхность где-то в средних широтах. Таким образом, арктическая атмосфера – это зона сохранения, активного перемешивания и перераспределения антропогенных примесей в Северном полушарии.

Абсолютные численные оценки таковы: на рубеже 80-90-х годов в среднем за год в Арктику должно было поступать не менее 1500 тонн свинца (что составляет около 3% суммарных атмосферных выбросов этого элемента европейскими источниками в 1990 г. [Гальперин и др., 1995]). Из этого количества около 50% оседало на поверхность внутри арктического региона. Для сравнения, по оценкам Aketvedt et al. (1994), в 1979/80 году соответствующим значения для свинца были 2400 тонн и (1-55) %.

В разделе 4.4 оцениваются потоки антропогенных примесей на подстилающую поверхность в Арктике и рассматривается механизм формирования таких выпадений в течение года. Показано, что зимой, несмотря на высокие концентрации примесей в атмосфере, выпадения на поверхность могут быть не самыми большими из-за малой скорости осаждения. Весной скорость осаждения начинает расти, и при значительных атмосферных концентрациях примеси поток ее на поверхность сравним с зимним. Примесь выводится на поверхность, а приток ее ослабевает. Летом концентрации примесей в воздухе и их потоки на поверхность убывают и достигают своих минимальных значений, хотя количество осадков максимально (рис. 1). Осенью, когда атмосферные концентрации антропогенных элементов начинают

расти, а скорость осаждения их на поверхность еще достаточно высока, количество примесей, выпадающее на поверхность, возрастает и может даже быть максимальным за год (например, в центре Российской Арктики – на СЗ и МД).

Экстраполируя наши результаты, полученные для российских пунктов наблюдений, на всю Арктику, были сделаны оценки (табл. 4) количества каждого элемента, выпадающего за год на поверхность всего СЛО площадью $14,76 \times 10^6 \text{ км}^2$. Видно, что наши оценки разумно соответствуют результатам Aketvedt et al., 1994], полученным при двух различных предположениях о количестве осадков в Арктике. Отметим также, что по нашим оценкам количество каждого микроэлемента, выпадающее за год на всю площадь СЛО, не превышает 1-2% от суммы атмосферных выбросов этого элемента всеми промышленными источниками Европы и азиатской части России. Подчеркнем, что наши оценочные значения потоков на поверхность, так же как и атмосферных концентраций, 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 на поверхность.

Степень соответствия реальности полученных количественных оценок существенно зависит от достоверности исходной информации об абсолютных значениях мощностей выбросов примесей рассматриваемыми регионами-источниками. Поэтому получение надежных данных о мощностях и составе атмосферных выбросов регионами-источниками – одна из ключевых проблем при модельных оценках уровня загрязненности атмосферы. Обобщение результатов инвентаризации и оценки мощностей атмосферных выбросов с территории Европы и бывшего СССР ретроспективно проводится в рамках международного сотрудничества и программы ЕМЕП (Европейская программа мониторинга загрязнений) с конца 70-х годов. В отчетах этой организации отмечалось, что различные оценки мощностей эмиссии могут сильно отличаться друг от друга (например, в 3 раза для свинца и даже в 10 раз для кадмия) [Гальперин и др., 1995; Tattason et al., 1997]. При расчетах по формуле (3) мы использовали значения Q , относящиеся к 1979 г., из работ [Расула et al., 1984; 1985]. Последующее развитие и совершенствование производства в Европе и СССР привело сначала к увеличению антропогенных выбросов в атмосферу (к 1982-83 гг.), а затем, после распада СССР, к их сокращению (к 1990 г. и далее) [Расула, 1998]. При этом значения мощностей выбросов конкретных рассматриваемых микроэлементов, приведенные в [Расула et al., 1984; 1985], лежат внутри интервала значений, характеризующих выбросы 1980-90-х годов. Учитывая большой разброс экспертных оценок, мы считаем, что использование этих данных для расчетов, проведенных в данной работе, вполне оправдано. Необходимо лишь подчеркнуть, что относительные вклады и количественные оценки средних концентраций и потоков примесей могут уточняться по мере получения более достоверной информации о мощностях выбросов соответствующих примесей промышленными регионами Северного полушария.

Раздел 4.6 посвящен оценкам вклада атмосферных аэрозолей в состав вод арктических морей России. В табл. 4 приведены средние годовые выпадения рас-

смагриваемых микроэлементов на площадь морей Российской Арктики, а также результаты сравнения вкладов аэрозолей и речного стока в содержание этих элементов в водах Карского моря и моря Лаптевых.

Таблица 4. Средние годовые потоки антропогенных микроэлементов на поверхность Северного Ледовитого океана и его морей, т год⁻¹.

Территория, площадь (10 ⁶ км ²)		As	Ni	Pb	V	Zn	Cd
Северный Ледовитый океан, 14.76	Наши оценки	40	120	340	80	180	9.2
	[Akeredolu et al., 1994]	-	-	150 770	- 59	-	3.9 28
Баренцево море, 1.42		2.5	8.5	31	7.0	18.5	0.68
Карское море, 0.88		1.5	5.3	17	3.6	9.2	0.39
Море Лаптевых, 0.66		1.1	3.6	13.3	2.0	5.1	0.23
Восточно-Сибирское море, 0.91		1.6	5.4	15	3.1	8.1	0.36
Чукотское море, 0.59		1.0	3.6	9.5	2.1	5.3	0.24
Сравнение вкладов атмосферных аэрозолей и впадающих рек (вдали от устьевых зон)							
Море Лаптевых	Реки, т год ⁻¹	13.5	60	26	135	160	0.65
	Атмосфера/реки	3/40	1/20	1/3	1/50	1/30	1/3
Карское море	Реки, т год ⁻¹	-	100	22.1	-	205	0.91
	Атмосфера/реки	-	1/20	1/2	-	1/50	2/5

Количество микроэлементов в водной взвеси, выносимой наиболее крупными реками (Лена, Яна и Хатанга) в море Лаптевых, оценено по данным [Gordeev et al., 1996] о средних годовых потоках воды и по экспериментальным данным [Rachold, 1999] о составе взвеси этих рек. Данные о составе вод, выносимых реками Обь и Енисей в Карское море, были взяты из [Gordeev, 2002].

Было учтено, что лишь около 5 % взвеси, содержащейся в речной воде, проникает в морские воды за пределы устьевой зоны (так называемого маргинального фильтра) [Лисицын, 1994]. Роль такого фильтра играет целый комплекс физических и химических процессов, происходящих при смешивании пресной и соленой

воды вблизи впадения реки в море и приводящих к эффективному осаждению водной взвеси в пространстве до первых десятков тысяч квадратных километров вблизи устья. Сравнение вкладов атмосферы и речного стока делалось в предположении, что суммарная площадь маргинальных фильтров впадающих рек составляет приблизительно 10% от площади соответствующего моря.

Из табл. 4 видно, что для каждого микроэлемента потоки, поступающие в воды центральной части рассматриваемых морей из атмосферы и с водами впадающих рек, сравнимы между собой. Отметим, что относительный аэрозольный вклад свинца и кадмия значительно выше, чем остальных элементов, и в Карском море он составляет около половины вклада речного стока таких крупных рек, как Обь и Енисей. Такое выделение этих двух элементов связано с тем, что в арктической атмосфере именно Pb и Cd имеют в большей степени антропогенное происхождение, чем остальные четыре элемента. А в рамках нашего подхода оцениваются атмосферные концентрации и потоки на поверхность только антропогенных составляющих аэрозоля или антропогенных долей концентраций примесей смешанного происхождения. Реальные же средние потоки на поверхность остальных четырех элементов могут быть значительно выше (за счет составляющих природного происхождения), и атмосферные вклады этих элементов в состав морской воды тоже могут оказаться сравнимыми с вкладом речного стока.

В [АМАР, 1997] отмечалось, что в удаленных районах Арктики средние уровни атмосферных концентраций и выпадений антропогенных примесей пока ниже порогов, опасных для флоры и фауны региона. Однако необходимо иметь в виду, что большую часть года осаждение загрязнений из атмосферы происходит на лед, который на огромной территории СЛО накапливает их, медленно перемещая от побережья Сибири вокруг Северного полюса и затем выносит через пролив Фрама в Северную Атлантику. Именно там при таянии льдов происходит интенсивная разгрузка арктических запасов антропогенных веществ, осевших из атмосферы.

Осаждаясь на поверхность СЛО, атмосферные аэрозоли участвуют в целом ряде физических, химических и биохимических процессов [Лисицын, 2004]. Процессы, происходящие со взвесью от момента ее попадания в морскую воду до связывания в донных осадках, весьма многообразны – от биохимических преобразований планктоном и бентосом до механического осаждения продуктов этой переработки и самих частиц взвеси. На процесс осадконакопления влияют также течения, волнение на поверхности (для прибрежных зон), глубина, рельеф дна и многие другие климатические и геофизические факторы [Айбулатов, 2003]. В результате скорость накопления и качество донных отложений в разных частях СЛО и в его морях могут сильно различаться.

Продолжая сравнение Карского моря с морем Лаптевых, отметим, что они существенно отличаются по климатическим и геофизическим характеристикам, которые влияют также на процессы образования донных осадков. В частности, в Карском море, где льды преимущественно однолетние, аэрозоли, выпавшие на лед, при таянии попадают в воду и влияют на состав водной взвеси именно самого Карского моря (с точностью до морских течений, связывающих его с Баренцевым морем).

При этом небольшие скорости течения и большая глубина Карского моря способствуют накоплению загрязнений на его дне. Наоборот, из м. Лаптевых, как говорилось ранее, льды разносят загрязнения по всей территории СЛО. Поэтому можно сказать, что аэрозоли, выпадающие на поверхность Карского моря, имеют локальное значение, тогда как аэрозоли, попавшие на поверхность м. Лаптевых, могут оказать свое влияние в других районах Арктики и даже внести свой вклад в состав вод Северной Атлантики.

До недавнего времени роль атмосферы в процессе загрязнения водных объектов арктического региона недооценивалась. Однако наши исследования показали, что для ряда антропогенных химических элементов вклад атмосферы может оказаться определяющим, особенно в центральных частях самого Северного Ледовитого океана и его морей.

Пятая глава посвящена исследованию долговременных тенденций и трендов (направленных изменений) в условиях переноса воздушных масс и формирования антропогенных примесей в арктической атмосфере. На рубеже второго и третьего тысячелетий в СПО наблюдались изменения целого ряда геофизических параметров (температура воздуха, осадки, граница вечной мерзлоты и т. д.) [АМАР, 2002; Израэль и др., 2002], указывающие на климатические сдвиги в Северном полушарии. Однако с точки зрения климатологии 10-летние ряды геофизических данных, которые рассматривались в главах 3 и 4, слишком коротки для выявления значимых подвижек в изучаемых процессах. Наши исходные данные дают возможность в некоторых случаях рассмотреть условия циркуляции атмосферы в СПО в течение интервала времени до 20 лет (с 1981 по 2000 гг.). Целью данной части работы было изучение изменений источников и стоков антропогенных аэрозольных примесей в атмосфере Арктики и влияния этих изменений на средние характеристики загрязнения арктической атмосферы в последние 20 лет XX столетия. Основные результаты этих исследований опубликованы в работах [32, 33].

В каком направлении и посредством каких механизмов изменения климата могут повлиять на загрязнение арктической атмосферы? Как было показано в главе 1, оптимальный режим для дальнего переноса антропогенных примесей в Арктику обусловлен специфическими метеорологическими условиями, существующими в СПО в холодную часть года, – это заснеженная или ледяная подстилающая поверхность, почти повсеместные и почти постоянные мощные приземные инверсии температуры, низкая влажность, малое количество осадков и др. Разрушение или уменьшение повторяемости этих условий при переходе к теплomu сезону приводят к резкому падению концентраций антропогенных составляющих арктической атмосферы к лету.

При тенденции к потеплению возможны аналогичные эффекты: 1) если арктический фронт в среднем будет смещаться к северу, то число регионов-источников, влияющих на загрязнение арктической атмосферы, может сократиться (рис. 2); 2) если температурные инверсии в приземном слое атмосферы СПО станут менее интенсивными, а их повторяемость уменьшится, то более интенсивное перемешивание в приземном слое воздуха должно увеличить скорость осаждения примесей на поверхность; 3) если средняя граница снежного покрова будет смещаться

к северу, а сроки снегозалегаия сократятся, то увеличится скорость сухого осаждения примесей на поверхность; 4) если влажность, количество туманов и осадков (особенно дождевых) в арктической атмосфере будут увеличиваться, то повысится эффективность осаждения примесей осадками. Все перечисленные явления должны снижать уровень загрязненности атмосферы Арктики, причем последние три должны приводить к сокращению длительности и дальности переноса примесей в СПО. Однако учет в модельных расчетах изменений скорости осаждения примеси на подстилающую поверхность возможен только при экспериментальном подтверждении этого предположения.

В разделе 5.1 представлены рассматриваемые многолетние ряды данных и подходы к их анализу. Нами изучались: (i) пространственные различия (по трем точкам в Российской Арктике) рассматриваемых процессов и характеристик весной на протяжении 15 лет с 1981 по 1995 г.; (ii) сезонные различия (по четырем месяцам года) этих же процессов и характеристик для одной географической точки МЛ на протяжении 15 лет с 1986 по 2000 г.; (iii) 20-летние изменения в процессах переноса воздуха в центральную часть Российской Арктики в апреле с 1981 по 2000 гг. (объединяя в единый массив все имеющиеся для этого месяца обратные траектории для СЗ и МЛ).

Изменения в процессах воздухообмена рассматриваются в разделе 5.2. В конце XX века перестройка циркуляционных процессов в атмосфере СПО происходила в направлении увеличения роли зональных и уменьшения роли меридиональных переносов воздушных масс (рис. 6А), что соответствует результатам [Виноградова и др., 2000; Бышев и др., 2002]. Это привело к ослаблению воздухообмена северных районов России с территорией Евразии и повысило вероятность перемешивания воздуха в пределах арктического региона. Особенно ярко эти закономерности проявляются в весеннее время года. Кроме того, весной и осенью постепенно уменьшалось число обратных траекторий, частично расположенных южнее 60°N , что можно рассматривать как косвенное подтверждение смещения в эти сезоны арктического фронта к северу.

В разделах 5.3 и 5.4 рассматриваются изменения в источниках и стоках примеси в арктической атмосфере. В результате изменений в процессах воздухообмена произошло перераспределение вкладов крупных промышленных регионов-источников в содержание различных антропогенных микроэлементов в аэрозоле арктической атмосферы. В процессах, очищающих атмосферу Арктики, усилилась роль осаждения примесей на подстилающую поверхность, а значение выноса примесей воздушными массами за пределы арктического региона уменьшилось.

Изменения в источниках и стоках антропогенных аэрозольных примесей в атмосфере Арктики (только за счет изменения циркуляции атмосферы, без учета снижения эмиссии регионов-источников) привели к изменению средних концентраций ряда антропогенных микроэлементов и их потоков на поверхность (раздел 5.5), а также несколько изменило сезонный ход этих характеристик. В частности, весной в последние 20 лет XX века в центральной части Российской Арктики средний уровень содержания антропогенных составляющих в атмосферном аэрозоле

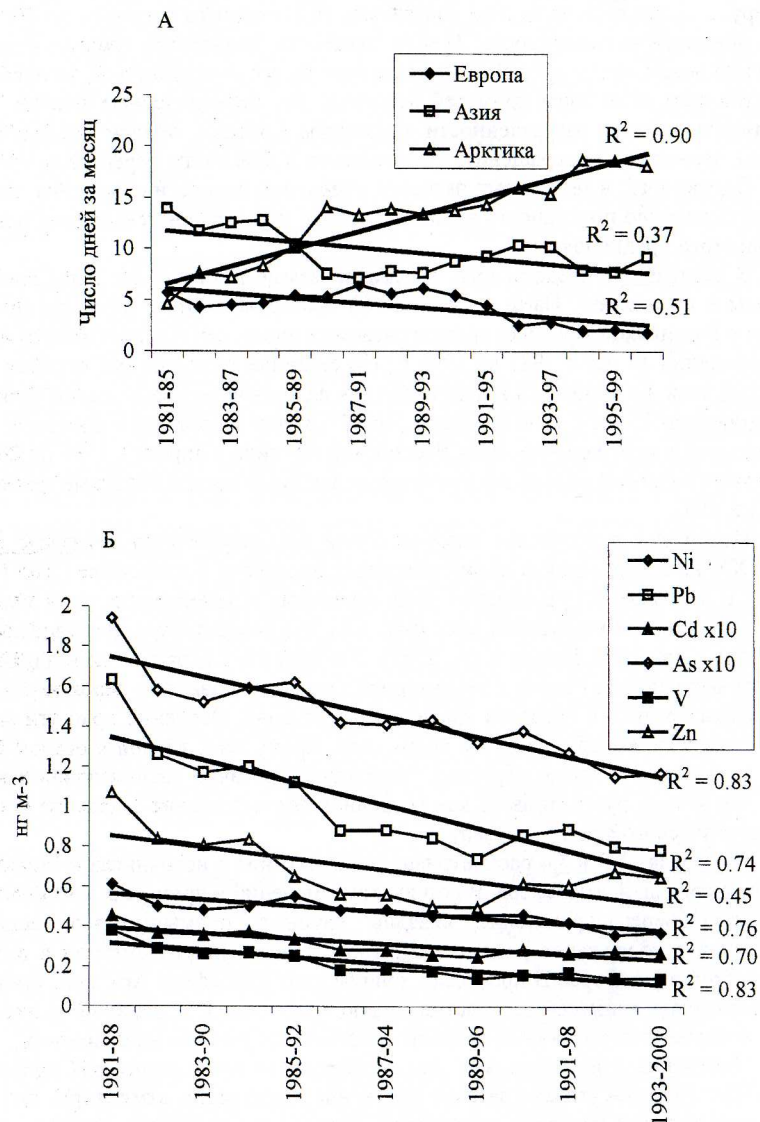


Рис. 6. 20-летние тренды для весны в центре Российской Арктики (объединение данных для СЗ и МЛ): А – повторяемость поступления воздуха с разных территорий; Б – средние атмосферные концентрации микроэлементов. Прямые – линейные тренды соответствующих временных зависимостей. R^2 – коэффициент достоверности аппроксимации.

понижался (рис. 6Б). Этот результат качественно подтверждается, например, экспериментальными данными о снижении в среднем на 40% содержания сажи (BC) в атмосфере Канадской Арктики за период 1989–2000 гг. [Sharma et al., 2002].

Что же касается средних годовых выпадений рассматриваемых микроэлементов из атмосферы на поверхность в Арктике, то они не могли значительно измениться только лишь за счет перестройки циркуляционных процессов в атмосфере СПО. Если же принять во внимание снижение мощностей антропогенных выбросов в Европе и в промышленных районах бывшего СССР, происходившее в 90-х годах, то можно с уверенностью утверждать, что средние годовые потоки антропогенных аэрозольных примесей на поверхность в Арктике в последние 15 лет прошлого столетия уменьшались.

При сохранении основных тенденций современных климатических изменений в Северном полушарии эффективность переноса антропогенных примесей воздушными потоками от крупных индустриальных областей в Арктику постепенно будет снижаться. В результате роль атмосферы как канала поступления загрязнений в арктический регион должна уменьшиться. При этом все большее количество вредных веществ, выбрасываемых в атмосферу в крупных индустриальных регионах, будет осаждаться на поверхность, не доходя до самых северных областей, загрязняя почву и водные объекты в среднеширотных и приарктических районах. Кроме того, оттаивание почвы на части территорий, прежде относящихся к зоне вечной мерзлоты, будет сопровождаться попаданием аккумулированных там (за многие годы) антропогенных составляющих в воды рек, впадающих в моря Северного Ледовитого океана. Поэтому роль речного стока как механизма загрязнения окружающей среды Арктики в целом будет возрастать.

В заключении резюмируются основные результаты работы и формулируются наиболее значительные выводы из проведенного исследования:

1. Получен первый и единственный для Российской Арктики многолетний ряд экспериментальных данных об элементном составе атмосферного аэрозоля в весеннем сезоне. Сформированы представления о природе различных микроэлементов в изучаемом аэрозоле, выделены элементы преимущественно терригенного (Al, Fe, Mn), морского (Na, Cl, Br) и антропогенного (Sb, Co, Zn) происхождения. В ряде случаев идентифицированы крупные промышленные регионы, расположенные в Западной и Восточной Европе, на Кольского п-ове, в районе Норильска, в Японии и в Северной Америке, являвшиеся источниками антропогенных составляющих аэрозоля в Российской Арктике.
2. Предложена и разработана методика оценки многолетних средних характеристик источников и стоков антропогенных примесей в арктической атмосфере, предполагающая использование результатов статистического анализа больших массивов прямых и обратных траекторий переноса воздуха, а также многолетних средних значений метеорологических параметров арктической атмосферы.
3. Оценены средние концентрации (и их сезонные изменения) ряда антропогенных микроэлементов в атмосфере Российской Арктики. Впервые учтено и оценено накопление антропогенных микроэлементов в воздухе Арктики в холодные сезоны. Сравнение с экспериментальными значениями показало, что зимой и вес-

ной средний уровень загрязненности атмосферы приблизительно одинаков на всем пространстве арктического региона.

4. Выявлены 4 промышленных региона – Северная Европа, Кольский п-ов, Урал и Норильск, – вносящие максимальные вклады в загрязнение атмосферы в западной и центральной частях Российской Арктики и конкурирующие друг с другом по значимости для разных мест и сезонов, а также в отношении разных примесей. Показано, что во все сезоны года вклад североамериканских промышленных областей в загрязнение атмосферы тихоокеанского сектора Арктики является определяющим (по сравнению с евроазиатскими источниками).
5. Изучены механизмы очищения арктической атмосферы от загрязнений и оценены их средние соотношения в разные сезоны. Показано, что в холодную часть года вклад осаждения аэрозолей снегом незначителен, при этом зимой наиболее эффективен вынос примесей воздушными массами за пределы Арктики, а весной эффективности сухого осаждения и выноса воздушными массами приблизительно одинаковы. Наоборот, в теплые сезоны очищение арктической атмосферы происходит преимущественно в результате осаждения примесей на поверхность внутри региона, причем преобладает вымывание осадками. В целом за год количество антропогенной примеси, уносимое из Арктики воздушными потоками, в среднем приблизительно равно ее массе, оседающей на поверхность внутри арктического региона.
6. Оценены средние потоки (и их сезонные изменения) антропогенных микроэлементов из атмосферы на подстилающую поверхность в Российской Арктике, в том числе сделаны оценки их годовых выпадений на поверхность арктических морей России. Показано, что средний годовой вклад атмосферных аэрозолей в загрязнение свинцом и кадмием вод центральной части моря Лаптевых и Карского моря, соответственно, может достигать 30 и 50 % от вклада речного стока. При экстраполяции полученных значений вертикальных потоков на всю территорию Арктики показано, что в среднем за год антропогенный поток рассматриваемых микроэлементов на всю поверхность Северного Ледовитого океана составляет менее 2% от их суммарных выбросов в атмосферу всеми промышленными регионами Европы и азиатской части России.
7. Изучены долговременные изменения в процессах воздухообмена в СПО в конце XX века, результатом которых было перераспределение вкладов источников загрязнений, а также различных каналов очищения арктической атмосферы. Это привело к изменению средних атмосферных концентраций ряда антропогенных микроэлементов и их потоков на поверхность в Арктике. В частности, по нашим данным весной в последние 20 лет XX века в центральной части Российской Арктики уровень содержания антропогенных составляющих в атмосферном аэрозоле понижался. В целом современные изменения климата в Северном полушарии (при их сохранении в дальнейшем) должны постепенно приводить к снижению эффективности переноса антропогенных примесей воздушными потоками из средних широт в Арктику, уменьшая тем самым роль атмосферы как канала поступления загрязнений в арктический регион.

Работа частично была выполнена при финансовой поддержке Российского Фонда фундаментальных исследований (гранты №№ 93-05-12100, 98-05-279, 96-05-00043, 00-05-64389, 00-15-98623) и Лаборатории им. О.Ю. Шмидта, ONR (проект RDO-1257).

В заключение автор выражает глубокую признательность **А.И. Воскресенскому** и В.Н. Капустину – инициаторам этой работы, а также А.П. Лисицыну и В.П. Шевченко, без внимания и поддержки которых эта работа вряд ли была бы завершена. Хочу также поблагодарить всех моих соавторов и отдельно И.П. Малкова за помощь в организации экспериментальных работ в 80-х годах и А.А. Кловиткина – безотказного помощника при оформлении рукописи.

Литература:

- Айбулатов Н.А. Экологическое эхо холодной войны в морях Российской Арктики // М.: ГЕОС, 2000. – 307 с.
- Белоусов С.Л., Пагава Т.С. Расчет траекторий воздушных частиц // Отраслевой фонд алгоритмов и программ «Гидрометслужба». 1998. № 257244 8.00150-01 13.
- Биненко В.И., Иванов В.А., Петрухин В.А. Аэрозольные измерения в Арктике и в районе вулканов // Первый глобальный эксперимент ПИГАП. Л.: Гидрометеиздат, 1981. Т. 2. С. 101-106.
- Брызгин Н.Н. Характеристики осадков в Российской Арктике, влияющие на удаление загрязнений из атмосферы // Тр. ААНИИ. С.- Петербург.: Гидрометеиздат, 1998. Т. 439. С. 135-148.
- Бурова Л.П. Влагосодержание инверсионных слоев атмосферы в Арктике // Тр. ААНИИ. Л.: Гидрометеиздат, 1981. Т.370. С. 111-130.
- Бызова Н.Л., Гаргер Е.К., Иванов В.Н. Экспериментальные исследования атмосферной диффузии и расчеты рассеяния примеси. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 278 с.
- Бышев В.И., Кононова Н.К., Нейман В.Г., Романов Ю.А. Особенности динамики климата Северного полушария в XX столетии // ДАН. 2002. Т. 384. № 5. С. 674-681.
- Виноградова Г.М., Завалишин Н.Н., Кузин В.И. Изменчивость сезонных характеристик климата Сибири в течение XX века // Оптика атмосфер и океана. 2000. Т. 13. № 6-7. С. 604-607.
- Гальперин М.В., 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.
- Израэль Ю.А., Павлов А.В., Анохин Ю.А. Эволюция криолитозоны при современных изменениях глобального климата // Метеорология и гидрология. 2002. № 1. С. 22-34.
- Климатический режим Арктики на рубеже XX и XXI вв. // Л.: Гидрометеиздат, 1991. 200с.
- Лисицын А.П. Маргинальный фильтр океанов // Океанология. 1994. Т. 34. № 5. С. 735-747.
- Лисицын А.П. Потоки осадочного вещества, природные фильтры и осадочные системы «живого океана» // Геология и геофизика. 2004. Т. 45. № 1. С. 15-48.
- Нагурный А.П., Тимерев А.А., Егоров С.А. Пространственно-временное поведение инверсионного слоя в нижней тропосфере Арктики // ДАН. 1991. Т. 319. № 5. С. 1110-1113.

- Остромогильский А.Х., Петрухин В.А. Тяжелые металлы в атмосфере: источники поступления и методы оценки их влияния // Мониторинг фонового загрязнения природных сред. Л.: Гидрометеиздат, 1984. Вып. 2. С. 56-70.
- Радионон В.Ф., Брызгин Н.Н., Александров Е.И. Снежный покров в арктическом бассейне. С.-Пб.: Гидрометеиздат, 1996. – 124 с.
- Сакунов Г.Г., Тимерев А.А., Бартенева О.Д. Аэрозольно-оптические характеристики атмосферы арктических районов // Метеорология и гидрология. 1990. № 2. С. 65- 71.
- Akeredolu F.A., Barrie L.A., Olson M.P. et al. The flux of anthropogenic trace metals into the Arctic from the mid-latitudes in 1979/80 // *Atm. Environ.* 1994. V. 28. No. 8. P. 1557-1572.
- AMAP. Arctic Pollution Issues: A State of the Arctic Environment Report. Oslo: AMAP, 1997. 188 p.
- AMAP. Arctic Pollution 2002. Oslo, Norway: AMAP, 2002. 111 p.
- Barrie L.A. Arctic air pollution: an overview of current knowledge // *Atm. Environ.* 1986. V. 20. No. 4. P. 643- 663.
- Barrie L.A. Occurrence and trends of pollution in the Arctic troposphere // NATO ASI Series. 1996. V. 143. P. 93- 129.
- Berg T., Hjelbrekke A.- G., Skjermoen J.E. Heavy metals and POPs within the ECE region // EMEP/CCC – Report 8/96. O-95038. NILU, Norway, 1996. 187 p.
- Gordeev V. Heavy metals in the Russian Arctic Rivers and some of their estuaries: concentrations and fluxes // Proc. of AMAP Workshop on Sources, Emissions and Discharges / Ed. by J.M. Pacyna. NILU OR 3/2002. 2002. No. 3. P. 79- 100.
- Gordeev V.V., Martin J.M., Sidorov I.S., Sidorova M.V. A reassessment of the Eurasian river input of water, sediment, major elements, and nutrients to the Arctic Ocean // *Amer. J. Sci.* 1996. V. 296. P. 664 – 691.
- Heintzenberg J., Tuch T., Wehner B., et al. Arctic haze over Central Europe // *Tellus.* 2003. V. 55B. No. 3. P. 796- 807.
- Kahl J.D., Harris J.M., Herbert G.A., and Olson M.P. Intercomparison of three long-range trajectory models applied to Arctic haze // *Tellus.* 1989. V. 41(B). No. 5. P. 524- 536.
- Mitchell J.M.Jr. Visual Range in the polar regions with particular reference to the Alaskan Arctic // *J. Atm. Terr. Phys.* 1957. Spec. Suppl. P. 195- 211.
- Pacyna J.M. Source inventories for atmospheric trace metals // *Atmospheric Particles*, Ed. by R.M. Harrison and R. Van Grieken, 1998. P. 385- 423.
- Pacyna J.M., Ottar B., Tomza U., and Maenhaut W. Long-range transport of trace elements to Ny-Alesund, Spitsbergen // *Atm. Environ.* 1985. V. 19. No. 6. P. 857-864.
- Pacyna J.M., Semb A., and Hanssen J.E. Emission and long-range transport of trace elements in Europe // *Tellus.* 1984. V. 36B. No. 3. P. 163-178.
- Rachold V. Major, trace and rare earth element geochemistry of suspended particulate material of East Siberian rivers draining to the Arctic Ocean // *Land-Ocean systems in the Siberian Arctic: Dynamics and history / Ed. by L. Timokhov.* Berlin: Springer- Verlag, 1999. P. 199 – 222.
- Rahn K.A., Lewis N.F., Lowenthal D.H., Smith D.I. Noril'sk only a minor contributor to Arctic haze // *Nature.* 1983. V. 306. No 5942. P. 459- 461.
- Rahn K.A., Lowenthal D.H. Elemental tracers of distant regional pollution aerosols // *Science.* 1984. V. 223. P. 132-139.

- Serreze M.C., Box J.E., Barry R.G., Walsh J.E. Characteristics of Arctic synoptic activity, 1952-1989 // *Meteorol. Atmos. Phys.* 1993. V. 51. P. 147- 163.
- Sharma S., Sirois A., Cachier H., Barrie L.A. Long term trends in atmospheric black carbon in the Canadian Arctic // *Joint CACGP/IGAC 2002 Int. Symposium.* 2002. 18-25 Sept. , Crete, Greece. P. 153.
- Shaw G.E. Evidence for a central Eurasian source area of Arctic haze in Alaska // *Nature.* 1982. V. 299. No. 5886. P. 815- 818.
- Shaw G.E. Chemical air mass systems in Alaska // *Atm. Environ.* 1988. V. 22. No. 10. P. 2239-2248.
- Shaw G.E. The Arctic Haze Phenomenon // *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* 1995. V.76. No.12. P.2403-2413.
- Sirois A., Barrie L.A. Arctic lower tropospheric aerosol trends and composition at Alert, Canada: 1980- 1995 // *J. Geophys. Res.* 1999. V. 104. No. D9. P. 11,599 - 11,618.
- Smakhtin L.A., Filipova N.V., Shokel E.S. The use of universal comparator method in large-scale INAA // *J. Radioanal. Nucl. Chem., Letters.* 1991. V. 155. P. 1- 8.
- Tarrasón L., Barrett K., Erdman L., Gusev A. Atmospheric Supply of nitrogen, lead and cadmium to the Baltic Sea. EMEP Summary Modelling Report for 1991-1995. EMEP/ MSC-W, 1997. 40 p.

Основные результаты диссертации опубликованы автором в работах:

1. Виноградова А.А., Малков И.П., Назаров Б.И. и др. Некоторые результаты исследования состава приземного аэрозоля арктических районов // *Изв. АН СССР. ФАО.* 1987. Т. 23. № 5. С. 519-524.
2. Виноградова А.А., Малков И.П., Назаров Б.И., Полиссар А.В. Об определении путей переноса антропогенного аэрозоля в северные районы // *Изв. АН СССР. ФАО.* 1988. Т. 24. № 7. С. 680-686.
3. Виноградова А.А. Арктический аэрозоль: загрязнения, микроструктура и оптические свойства // *Препринт ИФА РАН. М., 1992. № 2. 47 с.*
4. Виноградова А.А., Малков И.П., Полиссар А.В., Храмов Н.Н. Элементный состав приземного атмосферного аэрозоля арктических районов России // *Изв. АН. ФАО.* 1993. Т. 29. № 2. С. 164-172.
5. Виноградова А.А. Микроэлементы в составе арктического аэрозоля (обзор) // *Изв. АН. ФАО.* 1993. Т. 29. №4. С. 437-456.
6. Vinogradova A.A., Malkov I.P., Polissar A.V.. Investigation of the Arctic aerosol pollution // *Optical Monitoring of the Environment. SPIE.* 1993. V. 2107. P. 203-211.
7. Виноградова А.А., Полиссар А.В. Элементный состав аэрозоля в атмосфере центральной части Российской Арктики // *Изв. АН. ФАО.* 1995. Т. 31. № 2. С. 264-274.
8. Виноградова А.А. Элементный состав атмосферного аэрозоля Восточной Арктики // *Изв. АН. ФАО.* 1996. Т. 32. № 4. С. 479-486.
9. Виноградова А.А., Егоров В.А. О возможности дальнего атмосферного переноса загрязнений в Российскую Арктику // *Изв. АН. ФАО.* 1996. Т. 32. № 6. С. 796-802.
10. Виноградова А.А. Атмосферный перенос антропогенных примесей в центральную часть Российской Арктики // *Экологическая химия.* 1996. Т.5. № 1. С. 3-10.
11. Kuusk V.V., Pronin A.A., Radionov V.F., Savchenko A.V., Shevchenko V.P., Smirnov V.V., Vinogradova A.A. The short- and long-range variations of dispersal and chemical composition of Arctic aerosols // *Nucleation and Atmospheric Aerosols.* Ed. by Markku Kulmala and

- Paul E. Wagner. (Proc. of the Fourteenth Int. Conf. on Nucleation and Atmospheric Aerosols): Pergamon, 1996. P. 546-549.
12. Виноградова А.А., Егоров В.А. Оценка вкладов промышленных регионов Северного полушария в загрязнение атмосферы Российской Арктики // Изв. АН. ФАО. 1997. Т. 33. № 6. С. 750-757.
 13. Виноградова А.А. Атмосферный перенос пассивных примесей в разные части Российской Арктики в весеннее время года // ДАН. 1997. Т. 355. № 5. С. 677-679.
 14. Шевченко В.П., Виноградова А.А. и др. Распределение и состав аэрозолей Западной Арктики // ДАН. 1997. Т. 355. № 5. С. 673-676.
 15. Shevchenko V.P., Ivanov G.I., Vinogradova A.A., Burovkin A.A., Grudinova L.Ya. Composition of aerosols over the North-Western Kara and Barents Seas in august-october 1994 // Proc. of the Russian-Norwegian Workshop - 95. Norsk Polarinstittutt, Oslo, 1997. P. 359-362.
 16. Шевченко В.П., Виноградова А.А., Иванов Г.И., Серова В.В. Состав морского аэрозоля в Западной части Северного Ледовитого океана // Изв. АН. ФАО. 1998. Т. 34. № 5. С. 664-668.
 17. Виноградова А.А., Пономарева Т.Я. Воздухообмен в Российской Арктике весной и летом 1986 - 1995 гг. // Изв. АН. ФАО. 1999. Т. 35. № 5. С. 588-595.
 18. Виноградова А.А., Пономарева Т.Я. Источники и стоки антропогенных пассивных примесей в атмосфере Российской Арктики весной и летом // Изв. АН. ФАО. 2000. Т. 36. № 3. С. 357-365.
 19. Виноградова А.А., Шевченко В.П., Лисицын А.П. Атмосферные аэрозоли Арктики: состав, источники и выпадения // Труды Международной конференции "Физика атмосферного аэрозоля", Россия, Москва, 12-17 апреля 1999 г. М.: АО "Диалог-МГУ", 1999. С. 102-110.
 20. Shevchenko V.P., Vinogradova A.A., Ivanov G.I., Lisitzin A.P., Serova V.V. The composition of aerosols in the marine boundary layer over the St. Anna Trough and the Barents Sea // Berichte zur Polarforschung. 1999. V. 342. P. 15-26.
 21. Vinogradova A.A. Anthropogenic pollutants in the Russian Arctic atmosphere: sources and sinks in spring and summer // *Atm. Environ.* 2000. V. 34. Nos. 29-30. P. 5151-5160.
 22. Шевченко В.П., Лисицын А.П., Виноградова А.А., Смирнов В.В., Серова В.В., Штайн Р. Аэрозоли Арктики – результаты десятилетних исследований // *Оптика атмосферы и океана.* 2000. Т. 13. № 6-7. С. 551-576.
 23. Виноградова А.А., Пономарева Т.Я. Баланс антропогенных пассивных примесей в атмосфере Российской Арктики весной и летом // ДАН. 2000. Т. 372. № 4. С. 541-543.
 24. Шевченко В.П., Лисицын А.П., Виноградова А.А. и др. Состав аэрозолей над Северным Ледовитым океаном. // Международная аэрозольная конференция, посвященная памяти А.Г. Сутугина (Москва, 26-30 июня 2000 г.): Труды конференции. – М.: РИЦ МГИУ, 2000. С. 172 - 194.
 25. Виноградова А.А., Пономарева Т.Я. Баланс антропогенных примесей в атмосфере Российской Арктики зимой и осенью // ДАН. 2001. Т. 376. № 5. С. 671-674.
 26. Виноградова А.А., Пономарева Т.Я. Сезонные изменения атмосферных концентраций и выпадений антропогенных примесей в Российской Арктике // Изв. АН. ФАО. 2001. Т. 37. № 6. С. 761-770.
 27. Виноградова А.А., Пономарева Т.Я. Очищение арктической атмосферы путем выноса загрязнений в средние широты // *Оптика атмосферы и океана.* 2001. Т. 14. № 6-7. С. 505-509.

28. Виноградова А.А., Бурова Л.П. О механизмах очищения арктической атмосферы // ДАН. Т. 379. № 3. С. 377-380.
29. А.А. Виноградова, В.П. Шевченко, Т.Я. Пономарева, А.А. Клювиткин. Вклад атмосферных аэрозолей в загрязнение вод моря Лаптевых // *Оптика атмосферы и океана.* 2002. Т. 15. № 5. в печати.
30. Шевченко В.П., Лисицын А.П., Виноградова А.А., Серова В.В., Штайн Р. Потоки фэрозолей на поверхность Северного Ледовитого океана и их роль в осадконакоплении и в формировании природной среды Арктики // Опыт системных океанологических исследований в Арктике / Под ред. А.П.Лисицына, М.Е. Виноградова, Е.А. Романкевича / М.: Научный Мир, 2001. С. 385 – 393.
31. Shevchenko V., Lisitzin A., Vinogradova A., Stein R. Heavy metals in aerosols over the seas of the Russian Arctic // *Sci. of the Total Environ.* 2003. V. 306. P. 11-25.
32. Виноградова А.А. Многолетние изменения в процессах загрязнения арктической атмосферы // Изв. АН. ФАО. 2003. Т. 39. № 6. С. 799-808.
33. Виноградова А.А., Шевченко В.П., Пономарева Т.Я., Клювиткин А.А. Тренды 15-летних изменений в процессах переноса воздушных масс и антропогенных аэрозольных примесей в районе м. Лаптевых // *Оптика атмосферы и океана.* 2003. Т. 16. № 5-6. С. 426-431.
34. Шевченко В.П., Лисицын А.П., Виноградова А.А. и др. Новый взгляд на влияние эолового переноса на современное морское осадконакопление и окружающую среду в Арктике – результаты исследования аэрозолей и снежного покрова // Новые идеи в океанологии / Под ред. М.Е. Виноградова, С.С. Лаппо / М.: Наука, 2004. В печати.
35. Шевченко В.П., Штайн Р., Виноградова А.А. и др. Элементный состав аэрозолей в приземном слое атмосферы над морем Лаптевых в июле-сентябре 1995г. // *Океанология.* 2004. Т. 44. № 3. С. 505-513.