

В.П. Шевченко*, академик РАН **А.П. Лисицын***, **А.А. Виноградова****,
В.В. Смирнов***, **В.В. Серова***, **Р. Штайн******

Аэрозоли Арктики – результаты десятилетних исследований

*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва

**Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, г. Москва

***Институт экспериментальной метеорологии, г. Обнинск

****Институт полярных и морских исследований им. А. Вегенера, г. Бремерхафен, Германия

Поступила в редакцию 17.05.2000 г.

Представлены результаты исследований аэрозолей приземного слоя над морями Российской Арктики, а также в Центральной Арктике, в районе Северного полюса, выполненных в 10 экспедициях (1991–1998 гг.). Изучались минеральный и химический состав аэрозолей, распределение аэрозольных частиц по размерам, пути переноса аэрозольного материала и степень загрязненности арктической атмосферы антропогенными примесями. Особое внимание уделено оценкам горизонтальных и вертикальных потоков различных компонентов. Исследования проводились одновременно несколькими методами: улавливанием частиц на нейлоновые сети большой (10 м²) площади, фильтрацией воздуха через фильтры Whatman-41 и АФА-ХА, подсчетом частиц с помощью фотоэлектрических счетчиков.

Введение

Аэрозоли Арктики изучены крайне слабо. Между тем сравнительно с другими климатическими поясами здесь существуют особые условия, определяющие количество, свойства и состав аэрозольного материала. Прежде всего это положение в высоких широтах – в области глобальной дивергенции в ячейках вертикальной циркуляции. Здесь происходит выход аэрозольного материала стратосферы (максимум содержания на высотах около 20 км), его смешивание с материалом тропосферы и опускание в приземные слои с развитой облачностью, откуда этот материал осаждается. Эта модель подтверждается изучением радиоактивных выпадений после ядерных испытаний (рис. 1) [1]. Меридиональная циркуляция усиливается зимой [2].

Существенно различаются также условия захвата аэрозольного материала с поверхности континентов и морей. Зимой в Арктике поверхность суши на многие тысячи километров скована льдом и скрыта слоем снега, а поверхность моря, обычно поставляющая в атмосферу значительные количества морских солей, покрыта льдами. Влияние локальных и региональных источников аэрозольного материала (континентальных и морских) таким образом на долгое время исключается.

Другие необычные условия касаются аутогенной части аэрозолей, образовавшихся в верхних слоях атмосферы под влиянием космических лучей в условиях очень мощных электромагнитных полей (группа космогенных изотопов и др.). Вероятно, именно здесь – в Арктике и Антарктике – лучше всего можно оценить также и вклад метеоритного вещества, поступающего на Землю, а также влияние общего глобального фона планеты.

Имеются данные о том, что аэрозольный материал, выпадающий из атмосферы, является в условиях Арктики главным источником биогенных элементов, а также железа и ряда металлов, важных для развития жизни. Большой интерес представляет также изучение разнообразных антропо-

генных загрязнений, поступающих в Арктику из удаленных промышленных центров, дальних (> 1 тыс. км) и сверхдальних (> 10 тыс. км). Наконец, проводящиеся за последние годы спутниковые исследования поверхности суши и океана, в частности определение содержания хлорофилла в поверхностных водах, требуют корректировки на атмосферный слой, которая невозможна без детального изучения не только количества, но и качества (состава) аэрозольного материала.

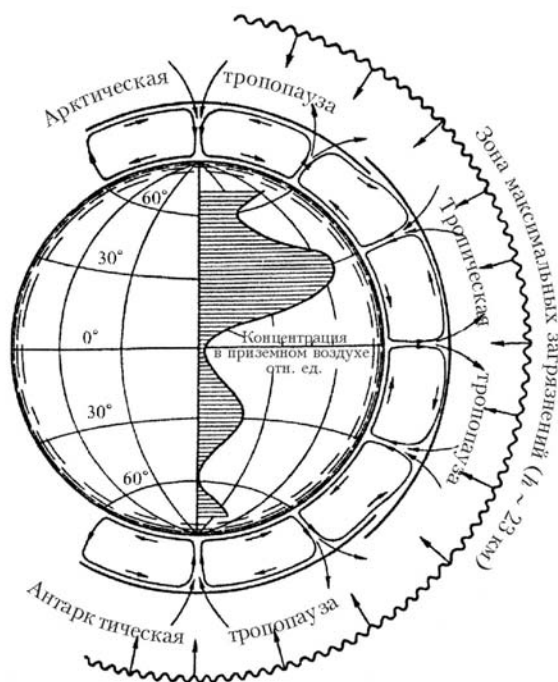


Рис. 1. Схема меридиональной циркуляции воздуха и распределения радиоактивных выпадений (заштрихована) при стратосферном типе переноса осадочного материала [1]

Аэрозоли в Арктике имеют особое значение еще и потому, что питание рек здесь преимущественно снеговое (50–80% для рек Сибири). При весеннем таянии воды скатываются с замерзшей поверхности почвы, и влияние самой почвы и коры выветривания на состав талых вод начинает сказываться только в конце паводка. Таким образом, состав речных вод здесь определяется в значительной мере составом снега – главного агента вымывания аэрозолей из атмосферы в зимние месяцы, т.е. 200–300 дней в году.

Другая особенность касается ледового покрова Арктики. Слой ежегодно выпадающего снега достигает здесь 30–40 см. Летом снег на поверхности льда тает, возникают снежицы, на дне которых идет концентрирование аэрозольного вещества из талых вод. Часть вод стекает в трещины и промоины, однако температура морских вод в полыньях и под дрейфующими льдами отрицательная (–1,7––1,8 °С). Пресная вода, стекающая с льдов, снова быстро замерзает, наращивая нижнюю часть льдин (аэрозоль переходит в криозоль). Таким образом, аэрозольный материал оказывается тесно связанным с дрейфующими льдами, постепенно входит в их толщу и поступает в морскую воду только после таяния – нередко эта экспозиция длится до 10–15 лет. Ледовый покров Арктики является аккумулятором аэрозольного вещества, его дополнительным переносчиком. Аэрозольный материал концентрируется в местах таяния (разгрузки) льдов сначала в водной взвеси, а затем в донных осадках.

Существенно влияние аэрозолей и на биоту Арктики. С аэрозолями на поверхность суши и льдов морей выпадают биогенные элементы, необходимые для развития фитопланктона. Следует отметить, что поступление биогенов с речными водами в Арктике значительно ниже, чем в других климатических зонах, что связано с отсутствием здесь в почвах азотобактера (низкие температуры), а также с слабым развитием химического выветривания. Именно аэрозоли обеспечивают цветение фитопланктона в снежниках на поверхности льдов, а также бурное развитие планктона у кромки льдов.

Существенно влияние аэрозолей также на осадочный процесс в Северном Ледовитом океане и его морях, поскольку содержание взвесей в реках Арктики в 10–20 раз ниже, чем в среднем для рек мира (20–30 мг/л при среднем значении для рек мира – около 500 мг/л) [3, 4]. Таким образом, аэрозоли в Арктике имеют важное значение в формировании условий среды, в том числе и как климатообразующий фактор.

К началу наших исследований уже была установлена интересная – необычная в других зонах – закономерность количественного распределения аэрозолей. Их наибольшие количества обнаружены не летом, когда поверхность суши освобождается от снега и может поставлять минеральный и растительный материал, а поверхность океана поставлять значительное количество соли, а зимой, когда суша и острова скрыты снегом. Это превышение по ряду определений достигает 5–10 раз.

Главная часть Арктики занята морем, но данных о закономерностях распределения аэрозольного вещества над морями высоких широт практически нет – большая часть наблюдений проведена на полярных станциях, расположенных на суше или на крупных островах.

Изучение аэрозолей проводилось ранее в Сибири, а также на о-вах Врангеля, Северная Земля, Земля Франца-Иосифа, на Шпицбергене и в Гренландии, а также в полярной части Канады, на Аляске [5–21]. Систематические исследования количественного распределения, состава и

других свойств аэрозольного материала в морских экспедициях в морях Российской Арктики были начаты нами в 1991 г. и продолжают по настоящее время, но пока опубликованы только отдельные результаты [22–30].

Ранее аэрозоли Арктики изучались в основном как вероятный источник загрязнений полярной экосистемы [6, 7, 10, 18, 31–33]. Наш подход к изучению аэрозолей был иным – наибольшее внимание уделялось роли эолового материала в формировании природной среды и климата Арктики, влиянию на биоту, льды, осадочный процесс, геохимию и литологию. Настоящая статья впервые знакомит с элементами этого нового подхода к изучению аэрозолей и показывает, в частности, что былые представления о ничтожной роли аэрозольного материала в формировании природной среды Арктики [34–36] оказываются ошибочными – поставка аэрозольного материала на поверхность дрейфующих льдов и в донные осадки, а также в скованные льдом водосборы рек (в виде вещества, связанного со снегом) оказывается очень значительной, а для многих элементов – главной. Истинные масштабы этого процесса стали выявляться только сейчас.

Изучение аэрозолей в Арктике проводилось по единой для Мирового океана программе [37–40 и др.] и по единой методике, что дает материал для сопоставления с другими климатическими зонами, которое начато в Институте океанологии около 40 лет назад.

1. Материалы и методы

Изучение аэрозолей в приповерхностном слое Арктики проводилось на протяжении 10 лет (1990–1999 гг.) сотрудниками лаборатории физико-геологических исследований Института океанологии РАН. Приведенные ниже результаты получены в основном для Западной и Центральной Арктики и сопоставлены с литературными данными для других регионов.

Необходимо отметить по крайней мере четыре важные методические особенности наших работ.

Первая из них – для всестороннего изучения количества и состава аэрозолей использовался комплекс взаимно дополняющих, а иногда перекрывающих друг друга методов, таких как:

- методы фильтрации воздуха через специальные фильтры,
- сбор больших количеств взвеси нейлоновыми сетями с использованием статического электрического заряда,
- определение размера аэрозольных частиц фотоэлектрическими счетчиками разных типов,
- определение вертикальных потоков аэрозолей изотопными методами, а также траекторий движения воздушных масс и аэрозолей методом обратной прокладки по коллекциям метеокарт и данным точечных наблюдений.

Второй кардинальной особенностью наших исследований является широкое применение комплекса седиментационных методов: сбор и изучение аэрозольного материала, выпадающего со снегом, находящегося на поверхности и в толще паковых льдов, из наземных ледников, из донных осадков морей и океанов (в отдельных случаях также и осадков озер).

Эти методы дают возможность получить данные не только в момент наблюдения с судна, но и в течение длительного времени – месяцы, сезоны, годы, десятки, сотни и тысячи лет. Такие продолжительные ряды наблюдений в Арктике обычно отсутствуют или возможны только в от-

дельных случаях. Это особенно важно и потому, что исследования ведутся не на постоянных станциях, а с движущегося судна, часто для участка маршрута более 100 км длиной. К исследованию аэрозолей привлекаются, таким образом, все виды природных самописцев, а сами исследования становятся системными. Они в наибольшей мере позволяют понять роль эолового материала в формировании природной среды. В круг исследований вовлекается координата времени, и, таким образом, впервые открывается возможность 4D анализа аэрозольной системы Арктики.

Третья особенность состоит в том, что наряду с данными судовой метеостанции измерения сопоставлялись с коллекциями синоптических карт региона, которые были предоставлены Гидрометеослужбой. Это позволило восстанавливать трассы перемещений воздушных масс, выявлять места вероятного захвата аэрозолей и места их разгрузки над акваторией Арктики, т.е. проводить динамический анализ аэрозольной системы.

Четвертая особенность состоит в том, что в отличие от обычных исследований особое внимание нами было уделено количественному изучению потоков аэрозолей, а также различных их компонентов, включая загрязнения. Для этого использовались прямые методы (изучение снега, выпавшего за определенное время), анализ осадкосборными системами, седиментационные методы и изотопные (^{210}Pb , ^7Be , ^{222}Rn и др.). Сочетание методов изучения вертикальных и горизонтальных потоков аэрозольного материала особенно важно при сопряженном анализе воздушного, ледового, водного и осадочного резервуаров в их взаимодействии, что позволяет поставить на новую основу мониторинг атмосферы.

Фильтрация воздуха проводилась через ацетатцеллюлозные фильтры АФА-ХА-20 с рабочей поверхностью 20 см^2 [41] и стекловолоконистые фильтры Whatman-41, которые улавливают также субмикронные частицы, в том числе частицы морской соли.

Вещества, собранного фильтрами, оказывается недостаточно для изучения минерального состава, а собранный материал засорен морской солью. Поэтому параллельно с фильтрацией использовался метод сбора больших количеств аэрозолей нейлоновыми сетями [38, 42]. Сети устанавливались в носовой части судна на высоте 4–9 м над палубой, их общая площадь составляла примерно 10 м^2 . Встречный поток воздуха вызывал возникновение электростатического заряда, которым притягиваются частицы. Однако, как показали специальные исследования, наиболее тонкие частицы улавливаются сетями не полностью. После экспозиции (обычно 1 сут) сети промываются дистиллированной водой, заряд снимается, и частицы отделяются от промывной воды фильтрацией через ядерный фильтр с размером пор $0,45\text{ мкм}$. Эти пробы не засорены морской солью. Схема участков отбора проб сетями показана на рис. 2. Всего удалось получить 68 полноценных проб. В ряде случаев сбор затруднялся дождями и снегом, а также штормовыми условиями. Параллельно методами фильтрации были собраны 53 пробы аэрозолей, которые использовались в основном для изучения химического состава.

Изучение гранулометрического состава аэрозолей проводилось при просмотре фильтрационных проб на сканирующем электронном микроскопе, а также определялось с помощью фотоэлектрического счетчика PC-218 фирмы «Roeco» (США) (диапазоны 0,5–1, 1–2, 2–3, 3–5, 5–10 мкм). Всего удалось в ходе рейсов провести 320 определений гранулометрического состава (рис. 3). Третий независимый способ гранулометрического анализа использован для параллельного изучения проб, собранных сетями. Взвесь отделялась от ядерных фильтров в ультразвуковой кювете [43], а затем анализировалась в диапазоне 0,5–100 мкм на лазерном электрооптическом счетчике частиц CIS-1 (Galai, Israel) в Институте полярных и морских исследований им. А. Вегенера (Германия).

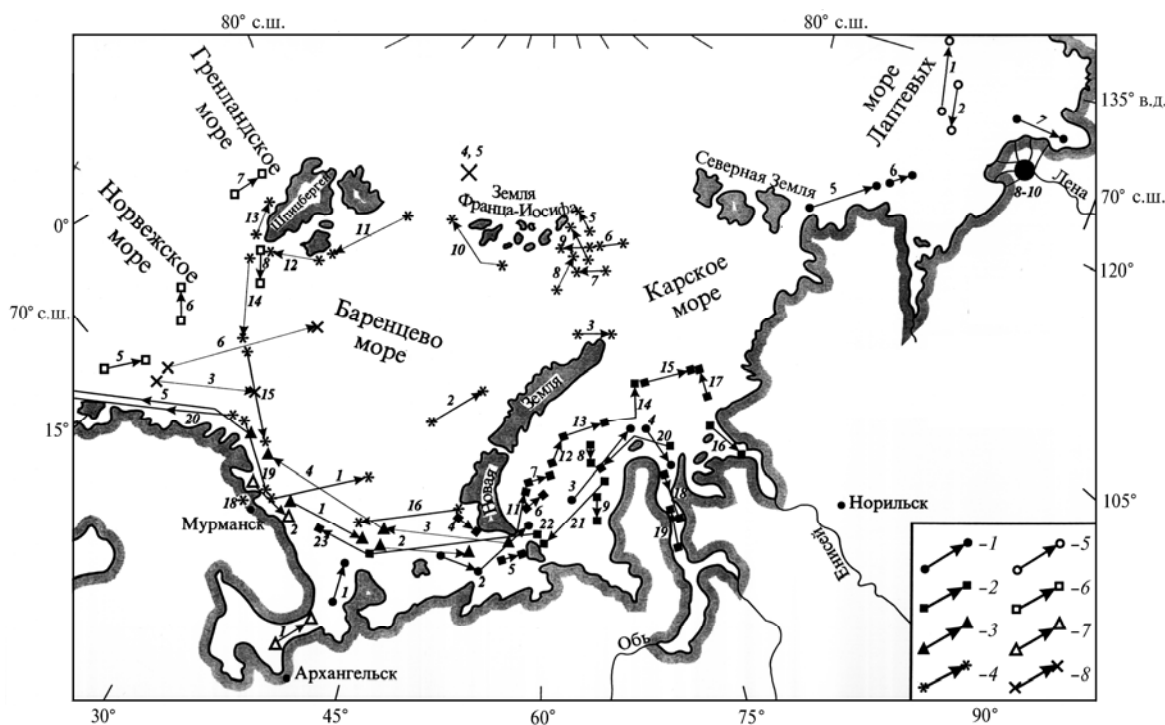


Рис. 2. Сетевые пробы аэрозолей Арктики: 1 – SPASIBA-91; 2–49-й рейс НИС «Дмитрий Менделеев»; 3–31-й рейс НИС «Академик Метислав Келдыш»; 4–9-й рейс НИС «Профессор Логачев»; 5 – ARK-XI/1 рейс НИС «Polarstern»; 6–15-й рейс НИС «Профессор Логачев»; 7–11-й рейс НИС «Академик Сергей Вавилов»; 8–14-й рейс НИС «Академик Федоров». Цифры у стрелок обозначают номера проб в соответствующих рейсах

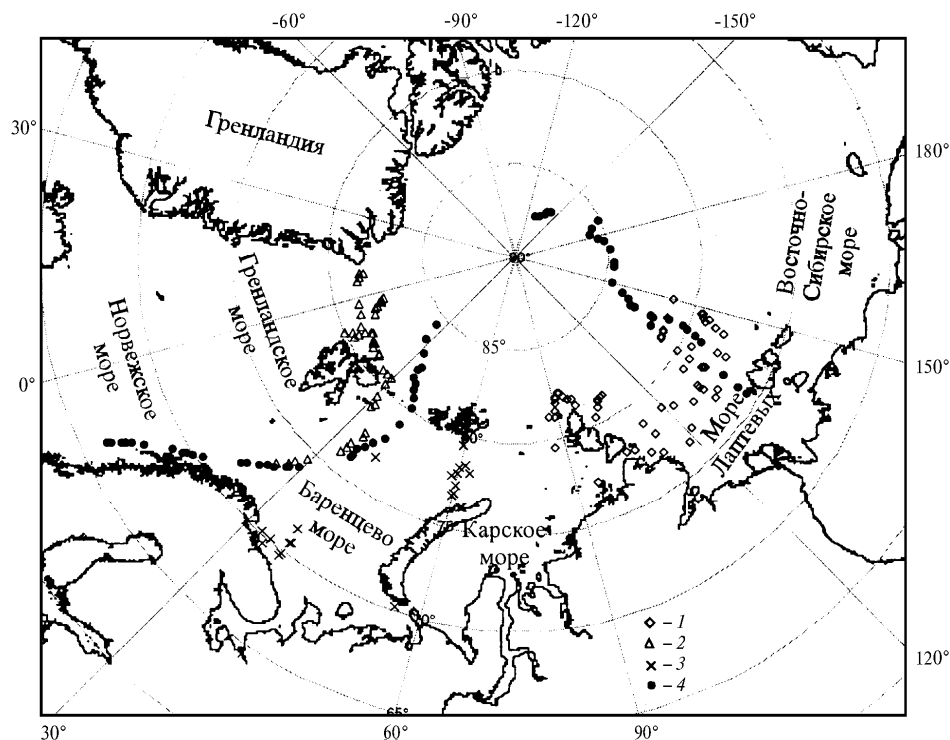


Рис. 3. Точки измерения гранулометрического состава аэрозолей Арктики: 1 – ARK-XI/1 рейс НИС «Polarstern» (июль–сентябрь 1995 г.); 2 – ARK-XIII/2 рейс НИС «Polarstern» (июль–август 1997 г.); 3–11-й рейс НИС «Академик Сергей Вавилов» (август–октябрь 1997 г.); 4 – ARK-XIV/1a рейс НИС «Polarstern» (июль 1998 г.)

Главным методом изучения химического состава аэрозолей был инструментальный нейтронно-активационный анализ (ИНАА) [44, 45]. Для определения ряда элементов использован также метод атомной абсорбции на приборе Перкин–Эльмер-3030 с графитовой кюветой (в Институте морской биогеохимии, Франция). Проанализированы 121 проба ИНАА и 10 проб атомной абсорбцией. В многих пробах проведено изучение отдельных характерных частиц с помощью микронзонда JXA-733 (Япония) в лаборатории проф. Р. Ван-Грикена [27]. В автоматическом режиме в каждом образце изучался элементный состав около 400 частиц размером от 0,4 до 15 мкм [46]. Изучено 10 проб.

Изучение состава аэрозолей проводилось с помощью сканирующего электронного микроскопа, минералогический анализ сетных проб выполнен методом иммерсии, а также рентгеновскими методами [24, 47].

Оценка вероятных источников аэрозолей и траекторий их поступления в Арктику проводилась путем анализа коллекции карт метеоданных для последних 10 лет [48, 49], а также путем расчета прямых и обратных траекторий движения воздуха в Российскую Арктику для апреля–июля 1986–1995 гг. по данным Гидрометцентра России [50]. Такой анализ выполнен пока для трех районов Арктики (Земля Франца-Иосифа, о. Врангеля и Северная Земля).

Методы седиментационных исследований аэрозолей (снег – лед – вода – донные отложения) описаны в ряде работ [51–53].

2. Результаты и их обсуждение

2.1. Количественное распределение аэрозолей

Содержание нерастворимой (бессолевой) части эоловой взвеси зависит от климатической зоны, близости круп-

ных массивов суши, направления и скорости ветра, влажности и атмосферных осадков [38, 40, 54–57]. Для Российской Арктики количественное распределение описано в ряде наших работ [22, 25, 29, 30, 58].

Самое высокое содержание нерастворимых в воде частиц ($1,38 \text{ мкг/м}^3$) было отмечено 19–20 августа 1996 г. в Гренландском море при северо-западном ветре, дующем со стороны Гренландии. Электронно-микроскопическое исследование и изучение химического состава этой пробы показали, что в ней преобладает терригенный материал, выдуваемый сильными ветрами (фенами) из почв и обнаженных пород прибрежных районов Гренландии. Очень сильные (катабатические) ветры при стекании воздушных масс с ледового купола Гренландии характерны для этого региона [59] и поставляют в прибрежную атмосферу большое количество сравнительно крупных ($> 2 \text{ мкм}$) частиц почвенного происхождения [60]. Самое низкое содержание эоловой взвеси ($0,02\text{--}0,06 \text{ мкг/м}^3$) зарегистрировано нами тогда, когда пробоотбор проводился вдали от суши после дождя, что характерно при вымывании аэрозолей атмосферными осадками [61].

Среднее значение содержания нерастворимых в воде аэрозольных частиц в приводном слое атмосферы Российской Арктики по 55 определениям равно $0,23 \text{ мкг/м}^3$ (стандартное отклонение $0,19 \text{ мкг/м}^3$). Это выше литературных данных по концентрациям в открытых частях океанов, особенно в гумидных зонах, но значительно ниже содержания взвеси в аридных зонах (табл. 1).

В Мировом океане содержание аэрозолей зависит от климатической зональности и удаления от суши (циркумконтинентальная зональность) и составляет от $0,01$ до $0,1 \text{ мкг/м}^3$ в открытых районах северной гумидной зоны Атлантического океана, от $0,02$ до $2,34 \text{ мкг/м}^3$ в

западной части экваториальной гумидной зоны Тихого океана вблизи островов и от 10 до 50 мкг/м³ в прибрежных районах северной аридной зоны Атлантики

[40, 57]. Содержание золы в Арктике характеризуется сильной пространственной и временной изменчивостью.

Таблица 1

Содержание нерастворимой фракции аэрозолей в приводном слое атмосферы над морями Российской Арктики сравнительно с другими районами Мирового океана

Район	Количество проб, <i>n</i>	Содержание, мкг/м ³				Источник
		min	max	среднее	стандартное отклонение	
Российская Арктика	55	0,02	0,97	0,23	0,19	Данная работа
Северная гумидная зона Атлантического океана, открытые районы	–	0,01	0,1	–	–	[40]
Там же, прибрежные районы	–	–	20	–	–	[40]
Северная аридная зона Атлантического океана, открытые районы	–	–	–	7.7	–	[40]
Северная аридная зона Атлантического океана, открытые районы	18	1,48	65,4	18	17,4	[57]
Там же, прибрежные районы	–	10	50	–	–	[40]
	3	5,8	11	–	–	[42]
Северная аридная зона Индийского океана, прибрежные районы	4	2	4,6	–	–	[39]
Северная аридная зона Индийского океана, прибрежные районы	3	0,92	4,4	–	–	[98]
Северная аридная зона Индийского океана, открытые районы	–	–	–	0,61	–	[40]
Северная аридная зона Индийского океана, открытые районы	3	0,01	0,07	–	–	[39]
Северная аридная зона Индийского океана, открытые районы	7	0,01	0,25	–	–	[98]
Северная аридная зона Тихого океана, западная часть	22	0,02	2,34	0,46	0,55	[100]
Южная аридная зона Атлантического океана, прибрежный район около Намибии	2	3,58	5,68	4,63	1,48	[99]

В морях Российской Арктики, в районах наших исследований циркумконтинентальная зональность выражена не очень ярко, так как маршруты судов в основном проходили вблизи суши (континента Евразии или крупных островов) (см. рис. 2), но тем не менее высокое содержание нерастворимых аэрозолей было отмечено в сухую погоду в наиболее близких к суше районах, особенно при ветрах, дующих со стороны суши. Например, в августе 1991 г. во время экспедиции SPASIBA-91 самые высокие концентрации золы (0,40–0,46 мкг/м³) были зарегистрированы вблизи материка при сильных ветрах (12–15,7 м/с), дующих со стороны суши. Количественное распределение аэрозолей – величина быстро меняющаяся, зависящая от сочетания многих региональных и локальных факторов.

Летом на содержание аэрозолей сильно влияют морские соли, составляющие до 70–80% взвеси на фильтрах [56, 62]. Содержание соли растет с ростом скорости ветра и сухости воздуха.

2.2. Гранулометрический состав аэрозолей

Содержание частиц крупнее 0,5 мкм над морем Лаптевых во время экспедиции ARK-XI/1 ледокола «Polarstern» (июль–сентябрь 1995 г.) по данным измерений в 63 точках находилось в пределах от 0,09 до 24,1 см⁻³ (в среднем 7,84 см⁻³; стандартное отклонение 6,47 см⁻³) [63], что близко к величинам счетных концентраций частиц такого же размера в Норвежском море, на о-ве Врангеля, на архипелаге Земля Франца-Иосифа и в средней полосе России (в Обнинске) [23, 64–67] и намного меньше концентраций в аридных районах Таджикистана (от 20 до 100 см⁻³) [68].

Общий вид кривой распределения концентраций частиц по размерам в приводном слое атмосферы над морем Лаптевых, над другими районами Арктики и над Обнин-

ском и другими сухопутными районами различается незначительно (см. рис. 3).

В общем случае содержание более мелких частиц (от 0,5 до 1,0 мкм) намного выше, чем крупных (рис. 4). В районах, где открытая (без льда) вода занимала более 30% поверхности, содержание частиц крупнее 0,5 мкм заметно возрастало при увеличении скорости ветра (рис. 5) [23, 28, 63]. Это отражает поступление в атмосферу частиц морской соли из тонкого поверхностного слоя морской воды (подтверждается также изучением элементного состава фильтрационных проб аэрозолей). Рост содержания частиц в приводном слое атмосферы при повышении скорости ветра ранее был отмечен и в других районах океана [65, 69, 70]. В северо-восточной части моря Лаптевых при скорости ветра больше 8 м/с содержание частиц > 0,5 мкм варьировало от 1,05 до 11,23 см⁻³, в среднем составляя 6,52 см⁻³ (по 30 измерениям в 10 точках), а при скорости ветра 3,3 м/с оно было равно всего 0,09 см⁻³ [63].

При образовании тумана общее содержание частиц крупнее 0,5 мкм остается на обычном уровне, в то время как количество частиц размером от 2 до 5 мкм резко возрастает (рис. 6) за счет образования крупных капелек тумана и конденсации более мелких частиц. Такое явление ранее было изучено как в полевых, так и в лабораторных условиях [71–73], оно очень существенно для вымывания вещества из атмосферы (взвешенные, коллоидные и растворенные формы).

В покрытой льдом северо-западной части Баренцева моря, в районе подводного плато Ермак и проливе Фрама содержание частиц размером от 1 до 2 мкм выше, чем в свободном ото льда море, особенно при температуре около –3 °С [74], что, по-видимому, является результатом роста микрокристаллов льда в приводном слое при понижении температуры [75]. Предварительная обработка материалов, полученных в рейсе ARK-XIV/1 «Polarstern» в Централь-

ной Арктике в июле 1998 г., выявила те же закономерности распределения аэрозольных частиц по размерам [76].

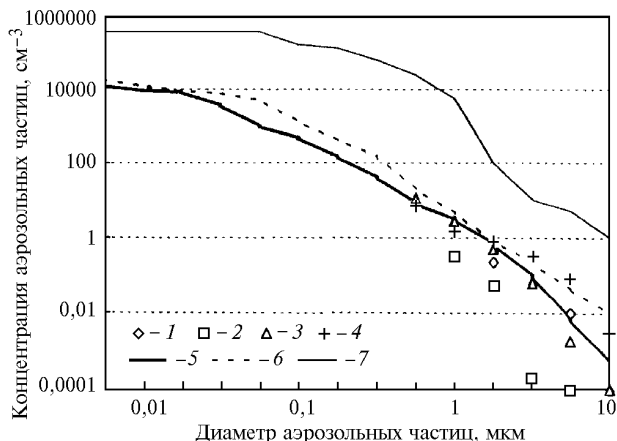


Рис. 4. Кумулятивная кривая гранулометрического состава аэрозолей приводного слоя атмосферы над морем Лаптевых с 20 июля по 10 сентября 1995 г. (данные рейса ARK-XI/1 немецкого судна «Polarstern») и других районов [23]: 1–4 – море Лаптевых (1 – все дни; 2 – ясные дни; 3 – дни с сильным ветром; 4 – дни с туманом); 5 – Земля Франца-Иосифа, весна 1994 г.; 6 – г. Обнинск Калужской области, май 1994 г.; 7 – Казахстан, пересохшее дно Аральского моря, пыльная буря 30 мая 1992 г.

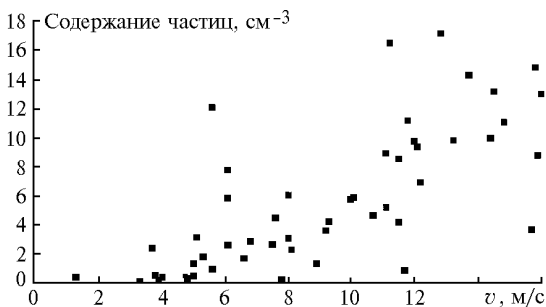


Рис. 5. Влияние скорости ветра на содержание частиц $> 0,5$ мкм в приводном слое атмосферы над морем Лаптевых в июле–сентябре 1995 г. (ARK-XI/1 рейс ледокола «Polarstern») [63]

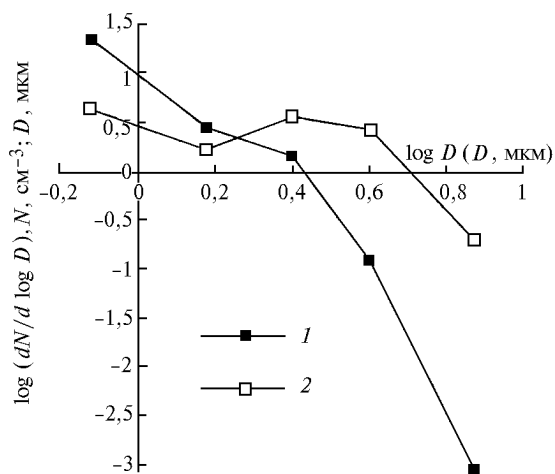


Рис. 6. Влияние погоды (влажности) на гранулометрический состав аэрозолей над морем Лаптевых в июле–сентябре 1995 г. (ARK-XI/1 рейс ледокола «Polarstern»): 1 – ясные дни; 2 – дни с туманом [63]

Определение гранулометрии нерастворимых частиц в 30 пробах аэрозолей, собранных сетевым методом в арктических морях, было выполнено в береговой лаборатории с помощью лазерного счетчика Galai-CIS-1 [29]. Средний размер частиц по счетному содержанию от пробы к пробе, по нашим данным, изменяется незначительно (от 1,24 до 1,69 мкм). Максимальный вклад в формирование объема (а значит, и массы) вносят более крупные частицы (от 5 до 25 мкм).

Обобщение результатов исследований гранулометрического состава аэрозолей, выполненное с помощью счетчиков частиц *in situ* и в лаборатории, и качественная оценка размеров частиц с помощью сканирующей электронной микроскопии показывают, что по количеству частиц в воздухе преобладают субмикронные солевые частицы, но источником осадочного материала (по массе) являются нерастворимые в воде частицы размером от 5 до 25, реже до 50 мкм.

2.3. Вещественный состав по данным электронной микроскопии

По данным электронно-микроскопического анализа [22, 25, 29, 58] крупные (> 1 мкм) несолевые частицы аэрозолей Арктики, отобранные сетевым методом, состоят в основном из минеральных частиц и органического вещества (растительные волокна, пыльца, диатомовые водоросли и др.).

Основным источником минеральных частиц являются почвы суши. Зимой основной вклад вносит дальний перенос [77, 78]. Растительные волокна длиной до нескольких сотен микрометров и пыльца сухопутных растений переносятся ветром на сотни километров. Растительные волокна выдуваются ветрами с поверхности арктических почв, содержащих большое количество растительных остатков [79, 80]. Пыльца и споры, обнаруженные в водной взвеси и в донных осадках арктических морей [81, 82], поступают на морскую поверхность в основном за счет эолового переноса.

В некоторых пробах отмечены диатомеи. Морские диатомовые водоросли поступают в приводный слой за счет выдувания ветром с поверхности морской воды, а пресноводные – за счет дальнего переноса пыли с поверхности пересыхающих в конце лета озер в тундре [83, 84]. Ранее диатомеи были обнаружены и изучены в аэрозольных пробах, взятых из других районов Мирового океана [85]. Только эоловым путем могут поступать пресноводные и морские диатомеи на ледовый купол Антарктиды вблизи Южного полюса, а также на ледовый купол Гренландии [86, 87].

Характерны для арктических аэрозолей пористые частицы пеплов (fly ash), имеющие обычно размер 5–50 мкм, и гладкие сферы диаметром 0,5–10 мкм. Они обнаружены в небольшом количестве в большинстве сетевых проб. Пористые углеродные частицы в основном поступают в атмосферу с выбросами металлургических, горнодобывающих комбинатов, тепловых электростанций, ТЭЦ. Еще одним их источником являются лесные пожары [88, 89]. Во всех экспедициях содержание пористых пепловых частиц в аэрозолях увеличивалось по мере приближения к Кольскому п-ву и Норильску. Эти частицы накапливаются также в арктических почвах, ледниках, донных осадках озер и являются индикаторами аэрозольного переноса загрязняющих веществ [90]. Исследования поверхностного слоя донных осадков озер, удаленных от промышленных центров (Шпицберген, Шетландские о-ва, северные районы Норвегии, Швеции и Финляндии), показали, что пористые углеродные частицы присутствуют во всех изученных озерах и содержание их находится на фоновом уровне

[91, 92]. В поверхностных слоях донных осадков озер Кольского п-ва близ предприятий горнодобывающей и металлургической промышленности их содержание резко возрастает [92]. Также сравнительно высокое содержание углеродных пористых частиц зафиксировано в поверхностном слое донных осадков озер других промышленно-развитых районов, в частности в осадках Великих Озер США [93].

Гладкие сферы диаметром 0,5–10 мкм образуются при высокотемпературных процессах, и их часто называют «сферами сгорания» (combustion spheres) [94]. Они выбрасываются в атмосферу не только металлургическими предприятиями, но и рядом других антропогенных источников, например, возникают при сжигании нефти и каменного угля, что подтверждается их химическим составом [95]. Они могут переноситься воздушными массами на большие расстояния (были найдены в аэрозолях Арктики [94, 96]).

Самое высокое содержание сфер сгорания (более 50% частиц крупнее 1 мкм) обнаружено нами в пробе 16, отобранной в южной части Карского моря в сентябре 1993 г. (49-й рейс НИС «Дмитрий Менделеев») при господствующем поступлении воздушных масс из региона Норильска (по картам барических ситуаций, рис. 7). Эта проба сильно загрязнена также другими аэрозольными частицами, образующимися при выбросе дымов Норильского медно-никелевого комбината (аномальный химический состав как сфер сгорания, так и пробы в целом).

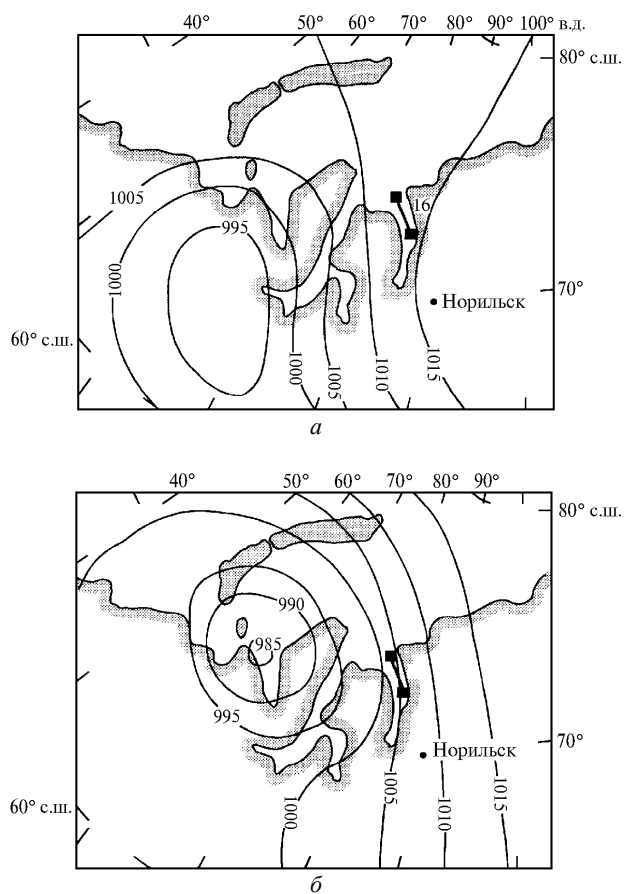


Рис. 7. Барические ситуации над Карским морем и прилегающим регионом в начале и в конце отбора сетевой пробы 16 в 49-м рейсе НИС «Дмитрий Менделеев»: а – 17 сентября 1993 г., 06.00 по Гринвичу (UTC); б – 18 сентября 1993 г., 06.00 UTC

Таким образом, электронно-микроскопические исследования морфологии крупных (> 1 мкм) нерастворимых аэрозольных частиц и определение биогенных остатков свидетельствуют о том, что в июле–сентябре основным источником эолового материала над арктическими морями является Евразия, хотя зимой резко увеличивается вклад дальних и сверхдальних (> 10 тыс. км) источников.

2.4. Минеральный состав

Минеральный состав аэрозолей является одним из важных индикаторов источников эолового материала [40, 47, 97, 98], он влияет также на оптику аэрозолей, их химический состав. Процентное содержание минералов, собранных нейлоновыми сетями, рассчитано на кристаллическую фазу. При этом изучался материал, состоящий в основном из частиц размером от 1 до 10 мкм [24, 47]. Минеральный состав полученных нами проб отличался сильной пространственной и временной изменчивостью.

Главный минерал нерастворимой фазы аэрозолей Арктики – кварц. Его содержание в конце августа – начале сентября 1991 г. в среднем равно 61,5% (от кристаллической фазы), в августе – октябре 1993 г. – 33,2%, в августе – октябре 1994 г. – 30,4%. В среднем (анализ 47 проб, отобранных в августе – октябре в трех экспедициях) аэрозоли Арктики содержат 36,8% кварца (стандартное отклонение 16,1%) (табл. 2). Самое высокое содержание кварца отмечено в пробах, отобранных вблизи материка, а самое низкое – в открытом море на максимальном удалении от берегов.

Содержание полевых шпатов составляет в среднем по всем пробам 9,4% (при стандартном отклонении 5,2%) (см. табл. 2). Одной из важных характеристик минерального состава аэрозолей является отношение кварц/полевые шпаты (Q/F). Величина Q/F зависит от интенсивности процессов выветривания, протекающих с преимущественным разрушением полевых шпатов и сохранением кварца [40]. В глинистых сланцах – главных осадочных породах континентов – величина Q/F отношения близка к 2 [102]. Повышение этого отношения свидетельствует о более интенсивном разрушении (выветривании) полевых шпатов, особенно значительном в тропиках. Например, в северной части Индийского океана (аридная зона) кварц-полевошпатовое отношение чаще всего находится в пределах от 2 до 3 [47], а на западе экваториальной зоны Тихого океана в апреле – июне 1990 г. в среднем 3,7 [100]. Еще выше оно в восточной части экваториальной зоны Атлантического океана близ берегов Африки – 6,8 [99]. В Российской Арктике также неожиданно зарегистрированы сравнительно высокие значения кварц-полевошпатового отношения. Среднее по 47 пробам Q/F равно 3,9, что свидетельствует о поставке в арктические моря минеральной взвеси из районов, где в почвах происходит сильное выветривание полевых шпатов, т.е. о дальних источниках.

Из глинистых минералов наиболее распространены в аэрозолях Арктики иллит, хлорит и каолинит (см. табл. 2). Иллит – главный глинистый минерал аэрозолей Арктики, а также мегапровинции континентальной коры, взвеси большинства рек (кроме рек экваториальной зоны, где повышены концентрации каолинита и монтмориллонита) [103]. Если принять сумму глинистых минералов за 100%, то в сетевых пробах аэрозолей Российской Арктики в августе – сентябре 1991 г., по нашим данным, иллит составлял в среднем 50,9%, в августе – октябре 1993 г. – 41,5%, в августе – октябре 1994 г. –

45,5%; для всех рейсов в Арктике среднее по 47 пробам – 42,9% от суммы глинистых минералов (стандартное отклонение равно 10,1%) (см. табл. 2).

Для сравнения укажем, что содержание иллита в аэрозолях экваториальной гумидной зоны (тропики запад-

ной части Тихого океана в апреле – июне 1990 г.) составляло только 20,2% от глинистых минералов аэрозолей [100], а в умеренной гумидной зоне северного полушария (Тирренское море, при поступлении воздушных масс со стороны Европы) – 67% [101].

Таблица 2

Средний минеральный состав золовой взвеси в приводном слое атмосферы над морями Российской Арктики в сопоставлении с другими районами Мирового океана (ср. – среднее значение, ст. откл. – стандартное отклонение)

Экспедиции, районы исследований	Количество проб, n	Содержание минералов в кристаллической фазе, %										Кварц /полевые шпаты	Содержание минералов, % (от суммы глинистых минералов)						Источник
		Кварц		Полевые шпаты		Иллит		Хлорит + каолинит		Монтмориллонит			Иллит		Хлорит + каолинит		Монтмориллонит		
		ср.	ст. откл.	ср.	ст. откл.	ср.	ст. откл.	ср.	ст. откл.	ср.	ст. откл.		ср.	ст. откл.	ср.	ст. откл.	ср.	ст. откл.	
SPASIBA-91 ¹	9	61,6	8,7	11,8	3,8	13,6	3,0	13,1	5,4	–	–	5,2	52,3	12,4	47,7	12,4	–	–	[27]
ДМ-49 ²	19	33,3	10,7	11,9	4,9	22,9	6,8	30,9	8,9	1,3	0,5	2,8	42,5	7,6	56,8	7,4	0,7	1,2	Данная работа [26]
ПЛ-9 ³	19	31,1	13,0	6,4	4,3	29,5	9,7	29,0	7,2	6,2	2,8	4,9	46,0	10,1	46,6	7,9	7,4	6,8	Данная работа [26]
Российская Арктика ⁴	47	37,8	16,1	9,7	5,2	23,8	9,6	26,8	10,2	4,7	3,3	3,9	45,8	10,1	50,9	9,8	3,3	5,6	Данная работа [26]
Экв. Атлантика ⁵	4	37,3	3,8	5,5	4,5	22,5	5,4	31,3	2,9	3,4	1,2	6,8	39,3		54,7		6,0		[99]
Экв. часть Тихого океана ⁶	13	51,9	13,1	13,9	4,2	6,9	2,3	27,3	11,2			3,7	20,2		79,8				[100]
Тирренское море ⁷													67		33				[101]
СВ Атлантика ⁸													45		41		14		[97]

¹SPASIBA-91 – международная экспедиция по исследованию арктической и сибирской акватории, море Лаптевых, август–сентябрь 1991 г.

²ДМ-49 – 49-й рейс НИС «Дмитрий Менделеев», Карское море, август–октябрь 1993 г.

³ПЛ-9 – 9-й рейс НИС «Профессор Логачев», Баренцево море, желоб Святой Анны, август–октябрь 1994 г.

⁴Российская Арктика – среднее по результатам трех упомянутых выше экспедиций.

⁵Экв. Атлантика – экваториальная часть Восточной Атлантики, сентябрь–октябрь 1990 г.

⁶Западная часть Тихого океана, экваториальная гумидная зона, апрель–июнь 1990 г.

⁷Тирренское море при поступлении воздушных масс со стороны Европы.

⁸Восточная часть Северной Атлантики между 05° и 35° с.ш., аридная зона.

Содержание в золовой взвеси над арктическими морями суммы двух других глинистых минералов («хлорит + каолинит», которые не удается разделить при анализе) в среднем составляет 42,9% (см. табл. 2). Из этих двух минералов наиболее важным компонентом арктических аэрозолей и донных осадков после иллита является хлорит. В ряде обобщающих работ [40, 101, 103] показано, что наиболее характерны для глинистых минералов почв суши и донных осадков холодных и умеренных зон иллит и хлорит. Их распределение соответствует климатической зональности, которая отражает зональность кор выветривания на суше.

В золовом материале, отобранном в экспедиции SPASIBA-91, в аэрозолях обнаружены только следы минералов монтмориллонитовой группы (смектитов). В аэрозолях 49-го рейса НИС «Дмитрий Менделеев» в Карском море его среднее содержание составляет всего 2,4% от суммы глинистых минералов (см. табл. 2). Много выше среднее содержание монтмориллонита (7,4%) в пробах, отобранных в августе – октябре 1994 г. в 9-м рейсе НИС «Профессор Логачев» близ Земли Франца-Иосифа (см. табл. 2; рис. 2). Распределение монтмориллонита (смектита) в аэрозолях арктических морей определяется распространением базальтов (Земля Франца-Иосифа, Патомское нагорье, бассейны Лены, Хатанги и Енисея, Аляска).

В почвах на берегах р. Лены, в ее нижнем течении, содержание монтмориллонита меньше 10% от суммы всех минералов [24]. Качественные оценки минерального состава почв арктической тундры Евразии также показывают, что содержание монтмориллонита в поверхностном слое почв обычно низкое [104]. Высокое содержание смектита отмечено в поверхностном слое донных осадков близ Земли Франца-Иосифа [105, 106]. Большая часть этих островов представляет собой типичные плато высотой от 50 до 600 м, бронированные пластовыми долеритовыми интрузиями и базальтами, при выветривании которых образуется смектит [107].

2.5. Химический состав аэрозолей

Химический состав аэрозолей определяется его источниками и типом химических превращений, которым подвергается аэрозольное вещество [61]. На основе современных методов анализа нам удалось изучить химический состав как индивидуальных аэрозольных частиц, так и валовый состав проб, собранных сетевым методом (нерастворимые в воде частицы) и фильтрацией воздуха (все аэрозольные частицы крупнее 0,5 мкм), включая морские соли. Химический состав, так же как минеральный, – один из важнейших маркеров аэрозолей.

а. Химический состав индивидуальных аэрозольных частиц

Элементный состав индивидуальных частиц аэрозолей в сетевых пробах, отобранных в экспедиции SPASIBA-91, изучен с помощью рентгеновского микронзонда на химическом факультете Антверпенского университета [22, 27, 58].

Органогенные частицы и сажевый углерод не дают главных индуцированных сигналов в рентгеновском

диапазоне и поэтому в автоматическом режиме анализировались только частицы, дающие ответное рентгеновское излучение после бомбардировки пучком электронов (табл. 3).

После статистической обработки данных были выделены четыре основных типа частиц арктического аэрозоля: 1) алюмосиликаты, 2) кварц, 3) Si-Fe- или Fe-Si-обогащенные частицы, 4) сферы сгорания (безуглеродный пепел), обогащенные Fe, P, Ni и некоторыми микроэлементами.

Таблица 3

Результаты электронно-микронзондового изучения состава индивидуальных аэрозольных частиц, отобранных в августе–сентябре 1991 г. в экспедиции SPASIBA-91 сетевым методом [58]

№ проб	№ главных групп	Встречаемость, %	Средний диаметр, мкм	Основные элементы	Идентификация
1	1	41,0	1,8	Si	Кварц
	2	32,0	1,7	Si, Al, Fe, K	Алюмосиликаты
	3	11,0	1,9	Fe, Si	Fe–Si-богатые
	4	4,0	1,0	Si, Fe	Si–Fe-богатые
2	1	43,5	1,7	Si, Al, Fe, K	Алюмосиликаты
	2	18,3	2,2	Si	Кварц
	3	16,5	0,6	Ni, K, Si	«Летучий пепел»
	4	10,3	1,2	Fe, Si, Cl, K	«Летучий пепел»
3	1	32,0	1,7	Si	Кварц
	2	28,8	1,8	Si, Al, Fe, K	Алюмосиликаты
	3	10,0	1,3	Fe, Si	Fe–Si-богатые
	4	4,3	2,7	Si, Fe, Ca	Si–Fe–Ca-богатые
4	1	34,0	1,5	Si	Кварц
	2	21,8	1,7	Si, Al, Fe	Алюмосиликаты
	3	17,5	2,2	Si, Fe	Si–Fe-богатые
	4	4,0	1,1	Si, Ti, Al, Fe	«Летучий пепел»
6	1	35,0	1,5	Si, Al, Fe, K	Алюмосиликаты
	2	12,8	1,3	Si	Кварц
	3	12,5	1,3	Si, Fe	Si–Fe-богатые
	4	8,0	1,2	Fe, Si	Fe–Si-rich
9	1	22,7	1,8	Si, Al, Fe, K	Алюмосиликаты
	2	15,8	2,0	Si, Fe, Al, K	Si–Fe-богатые
	3	9,7	2,4	Si, Fe, Mg	Si–Fe-богатые
	4	7,9	1,5	Fe, Si, Al, K	Fe–Si-богатые

Зерна минералов-алюмосиликатов диаметром от 1 до 5 мкм (в среднем 1,7 мкм) имеют неправильную форму и различную степень окатанности. Рентгеновский спектр одной из алюмосиликатных частиц приведен на рис. 8, а. Их можно считать минеральными частицами почвы, принесенными ветром.

Зерна кварца из аэрозолей обычно имеют размеры от 1 до 3 мкм и близкую к сферической форму. Обогащенные Si–Fe- и Fe–Si-частицы скорее всего являются также зернами кварца, покрытыми пленкой гидроксидов железа (так называемый речной кварц). Вариации содержания алюмосиликатов и кварца в пробах (см. табл. 3), по-видимому, связаны с изменчивостью состава почв.

Сферы сгорания, обогащенные Fe, P, Cl и микроэлементами, имели размер от 0,3 до 3 мкм. В режиме ручного управления микронзондом были обнаружены сферы сгорания, обогащенные такими элементами, как Fe, Ni, Cu, Cr, Zn, Ca, Mn и Sb. Например, в пробе 1 найдена сфера диаметром 0,5 мкм, содержащая 52% Sb, 29% Si и 19% Fe (принимая в расчет только элементы, дающие основные рентгеновские сигналы). На рис. 8, б, в приведены характерные рентгеновские спектры сфер сгорания из аэрозолей Арктики. Наиболее высокое со-

держание обогащенных микроэлементами сфер сгорания отмечено в пробе 16, отобранной из воздушных масс, поступивших из р-на Норильска.

Качественный элементный анализ отдельных аэрозольных частиц, собранных сетевым методом в море Лаптевых в конце июля 1995 г. (рейс ARK XI/1 ледокола «Polarstern», пробы 1 и 2) и в Карском и Баренцевом морях в сентябре – начале октября 1993 г. (49-й рейс НИС «Дмитрий Менделеев», пробы 16–18, 20, 23), был изучен на сканирующем электронном микроскопе SEM-515 с рентгеновской микронзондовой приставкой EDAX PV9900 (Philips, USA) в Институте полярных и морских исследований им. Альфреда Вегенера (г. Бремерхафен, Германия) [29]. Показано, что состав 110 сфер сгорания диаметром от 1 до 10 мкм отличается от района к району (табл. 4). В море Лаптевых они состоят в основном из Si, Al, K, Fe, Mg, а в центральной части Карского моря из Si, Al, Fe, K; в южной части Карского моря из Fe, Ni, Si, Cu (поступление аэрозолей из р-на Норильска); в южной части Баренцева моря из Si, Al, Fe, Ni (влияние промышленных предприятий Кольского п-ва).

Таким образом, исследование элементного состава индивидуальных нерастворимых аэрозольных частиц в приземном слое атмосферы над арктическими морями

микронзондовым методом показало, что неорганическая часть аэрозолей состоит главным образом из минеральных частиц (в основном кварца и алюмосиликатов) почв суши. Практически во всех пробах обнаружены в незначительном количестве антропогенные пепловые частицы, обогащенные Fe, Ni, Cu, Cr, Zn, Ca, Mn и Sb. Содержание пепловых частиц – маркер аэрозолей из промышленных районов – Норильска и Кольского п-ва.

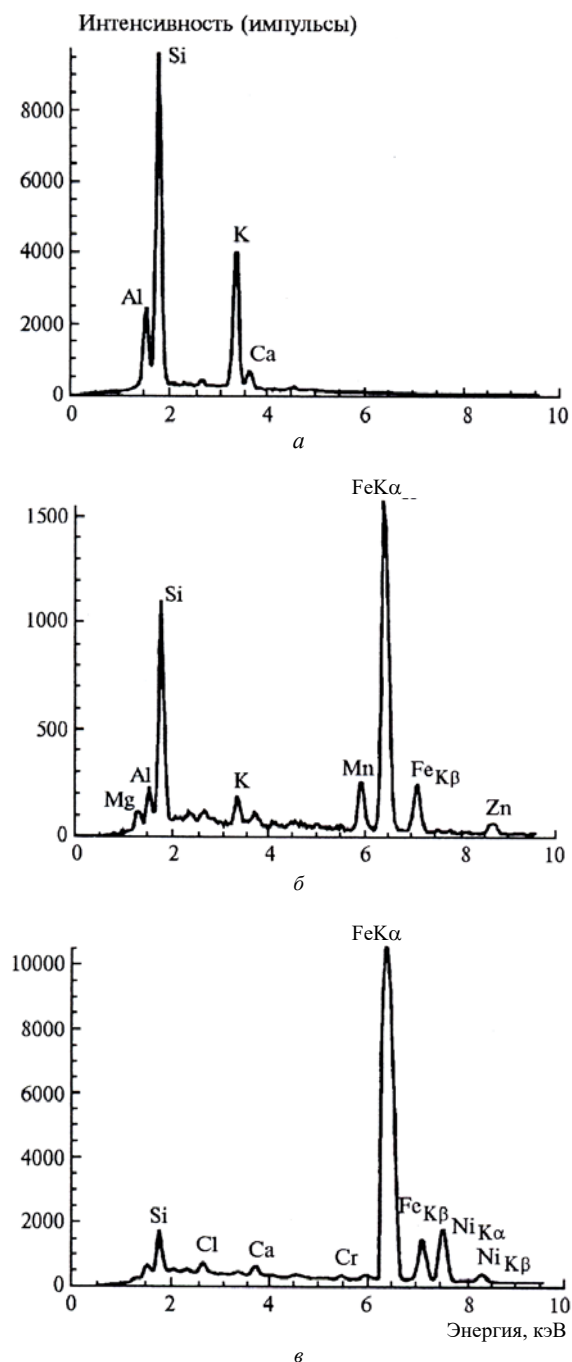


Рис. 8. Рентгеновские спектры аэрозольных частиц, собранных сетевым методом в экспедиции SPASIBA-91 (микронзондовый анализ выполнен в Антверпенском университете, Бельгия): а – угловатая алюмосиликатная частица (проба 6, размер частицы 5 мкм); б, в – сферы сгорания (б – проба 1, диаметр 0,7 мкм; в – проба 6, диаметр 0,5 мкм)

Качественный элементный состав «сфер сгорания» размером от 1 до 10 мкм в сетевых пробах аэрозолей, собранных в море Лаптевых и в Карском и Баренцевом морях в сентябре 1993 г. (49-й рейс НИС «Дмитрий Менделеев») и в июле 1995 г. (ARK-XI/1 рейс ледокола «Polarstern») по результатам микронзондового исследования индивидуальных частиц на приборе EDAX PV9900 в Институте полярных и морских исследований им. Альфреда Вегенера, Бремерхафен, Германия [29]

Район, пробы	Типы частиц по преобладающим химическим элементам
Море Лаптевых, пробы ARK-XI/1-1* и ARK-XI/1-2	1) Si, Al, K, Fe (Mg, K) 2) Si, Al, Fe (K, Mg) 3) P, Si, Al, S (Mg, Fe, Ca) 4) Fe, Al, P (Cu)
Южная часть Карского моря, Пробы ДМ-49-16**, ДМ-49-18 и ДМ-49-20	1) Fe, Ni, Si (Cu, Al) 2) Fe, Si, Ni (Cu, Al, Mg, Ca) 3) Si, Fe, Cu, Al 4) Si, Al, K (Fe) 5) Fe, Cu, Ni, Si
Центральная часть Карского моря, проба ДМ-49-17	1) Si, Al (K, Fe) 2) Fe, Si, Al 3) Fe, Ni, Si (Cu)
Южная часть Баренцева моря, проба ДМ-49-23	1) Si, Al (Ca, Fe, K, Mg) 2) Fe, Si, Ni (Al, Cu, Mg, Ca) 3) Fe, Ni, Si (Cu, Ca, Al)

* Проба 1, отобранная в ARK XI/1 рейсе ледокола «Polarstern».

** Проба 16, отобранная в 49-м рейсе НИС «Дмитрий Менделеев».

б. Средний элементный состав аэрозолей (нерасстворимая часть)

Главное значение в пробах аэрозолей Арктики, собранных сетевым методом, имеет органический углерод (углерод, измеренный в пробе после обработки ее раствором соляной кислоты (1:1 по объему)) [108]. Из-за малого количества вещества содержание $C_{орг}$ удалось определить только в 18 пробах, отобранных в экспедиции SPASIBA-91, в 49-м рейсе НИС «Дмитрий Менделеев» и в 15-м рейсе НИС «Профессор Логачев». Оно варьирует от 7,54 до 48,9%. В пересчете на органическое вещество (ОВ) это составляет около 14–97%, т.е. аэрозоли Арктики являются важным источником органического вещества. Среднее содержание $C_{орг}$ составляет 30,2% (стандартное отклонение равно 12,5%) (около 60% ОВ). Многочисленные исследования, выполненные в последние годы, показывают, что органическое вещество является одним из основных компонентов аэрозолей как над сушей, так и над океаном. Содержание $C_{орг}$ иногда может достигать 60% от общей массы частиц [98, 109–111].

В четырех пробах, отобранных нами в экспедиции SPASIBA-91, Э. Кашье (E. Cachier) в Центре по изучению радиоактивности (г. Жиф-сюр-Ивет, Франция) были отдельно определены концентрации сажевого углерода. Отношение концентрации сажевого углерода к концентрации общего углерода в наших пробах изменяется от 0,22 до 0,27, что характерно для «индустриальных» аэрозолей. Ранее высокие концентрации сажевого углерода были обнаружены также на побережье Аляски (м. Барроу), причем отношение сажевого углерода к общему достигало 0,40 [112]. Вероятными источниками сажевого углерода являются антропогенная деятельность или таежные пожары. Недавно было показано,

что сажевый углерод, состоящий из субмикронных частиц, может переноситься далеко от источника [70, 113, 114]. Он оказывает сильное воздействие на экосистему за счет влияния на оптику атмосферы – высокой абсорбции солнечной радиации. В целом распределение сажевого углерода в атмосфере Арктики отличается значительной неоднородностью, пятнистостью [115–117], что связано с пятнистым расположением источников сажевого углерода, и меняется во времени.

Среднее содержание Si в сетевых пробах – 13,4% (стандартное отклонение равно 7,7%), а среднее содержание Al – 2,66% (стандартное отклонение равно 1,76%) (аналитик – А.Б. Исаева). Используя Al в качестве индикатора терригенного вещества и принимая среднее содержание его в земной коре 8,23% [118], мы определили содержание терригенной компоненты в аэрозолях Арктики. Оно равно в среднем 32,3%. Таким образом, на биогенную часть приходится 67,7%, т.е. в 2 раза больше. Это соответствует и результатам микроскопических исследований, и определениям $C_{орг}$ и ОВ. В гумидной экваториальной зоне Северной Атлантики терригенное вещество составляет около 100% нерастворимых в воде аэрозолей при содержании $C_{орг}$ менее 3% [57, 119]. Среднее значение отношения Si/Al в арктических аэрозолях, по нашим данным, равно 4,01, что немного выше, чем для земной коры (3,42) [118] и континентальных глин (3,06) [120], но значительно выше характерных для гумидной экваториальной зоны Северной Атлантики значений (2,47 [57] и 2,03 [119]). Обогащение алюминием тропических аэрозолей связано, вероятно, с тем, что терригенным источником там являются коры выветривания и почвы тропического пояса, обогащенные Al относительно Si [121].

Содержание химических элементов в сетевых пробах меняется в очень широких пределах. Для определения происхождения аэрозолей были рассчитаны коэффициенты обогащения относительно среднего состава земной коры. Для каждого элемента коэффициент обогащения (КО) рассчитывали по формуле:

$$КО = (\text{эл./Al}) \text{ проба}/(\text{эл./Al}) \text{ земн. кора},$$

где эл. и Al – концентрации интересующего элемента и алюминия в пробе и в земной коре [118] соответственно. Например, в сетевых пробах экспедиции SPASIBA-91 по значениям КО рассматриваемые элементы разделяются на две группы:

1) элементы, типичные для земной коры ($КО < 10$) – Na, Mg, Al, K, Ca, Sc, Mn, Fe, Co, Ni, As, Rb, Cs, Ba, PЗЭ (редкоземельные элементы), Hf, Ta, Th, U;

2) антропогенные элементы ($КО > 10$) – Cr, Cu, Zn, Se, Br, Ag, Cd, Sb, W, Au, Pb.

При промывании сетей бидистиллированной водой морские соли удаляются, поэтому группа элементов, связанных с морскими солями, не оказывает влияния. Наиболее высокие КО аэрозолей для Cr, Cu, Sb, Pb отмечены в пробе 6, отобранной над морем Лаптевых (при южном ветре) (см. рис. 2). В пробах 6 и 5 даже для никеля, который обычно относят к коровым элементам, КО больше 10 (12 и 13,5 соответственно). В пробах 5 и 6 при микросондовом анализе обнаружено также наибольшее количество антропогенных сфер сгорания. Очевидно, основной источник загрязнения отобранных проб по данным микросондового анализа и КО находится в районе Норильска.

Норильский горно-металлургический комбинат – один из крупнейших в мире предприятий по добыче и переработке медно-никелевых руд. Он – один из основных

северо-востоке России источников загрязнения атмосферы соединениями S, Se, Cu, Ni, Co, Sb, As, Pb, Zn, Hg [122–124].

Проба 16, отобранная 18 сентября 1993 г. в 49-м рейсе НИС «Дмитрий Менделеев» в Енисейском заливе (см. рис. 1), при сильном (10,4 м/с) южном ветре имеет самые высокие по сравнению с другими пробами коэффициенты обогащения такими элементами, как Se ($КО = 22000$), Ni (418) и As (43). В этой же пробе обнаружено и самое высокое содержание сфер сгорания. Она была отобрана на пути движения воздушных масс из района Норильска (см. рис. 7). Это подтверждает высказывавшиеся ранее утверждения о том, что Норильский регион является существенным источником загрязнения атмосферы Арктики [10, 125], особенно для морей Карского и Лаптевых.

Ранее показано, что природный и антропогенный источники селена в аэрозолях примерно равны [126, 127]. Самым важным природным процессом поставки селена в атмосферу является образование его органических соединений фитопланктоном, поскольку биогеохимическое поведение Se близко к поведению S [128, 129]. Основные антропогенные источники Se – сжигание угля, нефтепродуктов, древесины и деятельность горнодобывающей и металлургической промышленности (особенно выплавка меди) [126, 127]. Обогащение аэрозолей селеном – один из маркеров работы медно-никелевых комбинатов.

В августе – октябре 1994 г. аэрозоли были изучены над Баренцевым морем и над желобом Святой Анны в 9-м рейсе НИС «Профессор Логачев» [25, 26]. Отобрано 20 проб сетевым методом (см. рис. 2). Самые высокие коэффициенты обогащения сетевых проб Co, Ni, Cu, Zn отмечены в пробе 17 близ Мурманска. В этой пробе присутствует большое количество антропогенных сфер сгорания. Содержание большинства химических элементов в сетевых пробах аэрозолей, собранных в этом рейсе, ниже их среднего содержания в земной коре, что может быть объяснено «разбавлением» нерастворимых аэрозолей органическим веществом. Более высокое, чем кларковое, содержание отмечено только для Cr, Cu, Zn, As, Se, Br, Ag, Sb, Au, основной их источник – антропогенный. Сравнение среднего состава проб, вблизи Земли Франца-Иосифа (пробы 3–10) и вблизи Кольского п-ва (15–19) (см. рис. 2) показало, что содержание хрома примерно в полтора раза выше вблизи Земли Франца-Иосифа, в то время как содержание никеля примерно в пять раз выше около Кольского п-ва. Повышенное содержание Cr в аэрозолях около Земли Франца-Иосифа связано с широким развитием на этом архипелаге основных магматических пород – долеритов и базальтов [107], обогащенных хромом [118, 130]. Повышение содержания никеля близ Кольского п-ва объясняется поступлением в район исследований аэрозолей, загрязненных выбросами металлургических комбинатов Кольского п-ва. Спектры обогащения металлами аэрозолей Кольского п-ва и района Норильска очень близки, поскольку заводы Кольского п-ва работают в значительной мере на руде из Норильска.

Для выявления геохимических связей между элементами были выполнены корреляционный и факторный анализы. Корреляционная матрица элементного состава сетевых проб аэрозолей Карского моря приведена в табл. 5. Для 18 проб критический уровень значимости коэффициента корреляции на 5%-м уровне равен 0,468 [131]. Очень высокие положительные ($> 0,87$) коэффициенты корреляции существуют между скандием (типичным индикатором терригенности осадочного материала) и Na, Ca, Fe, Cs, Ag, Hf, Ba, Th. Основным источником

этих элементов в неводорастворимой фракции аэрозолей Карского моря являются почвы тундры и лесотундры, а также терригенный эоловый материал из более удаленных регионов, поставляемый в Арктику воздушными массами (влияние морских солей исключено при обработке проб). Более низкие, но все же значимые коэффициенты корреляции существуют между Sc и Cr (0,65) и Sc и Mo (0,57), в то время как коэффициент корреляции между Cr и Mo равен

0,99; у хрома также высокие коэффициенты корреляции с Br (0,89), Ag (0,88), Ca (0,85), Au (0,75), Fe (0,74), Zn (0,74), Ba (0,73) и Th (0,70). Можно предположить, что основным источником Cr и Mo также являются почвы и горные породы поверхности суши. Очень высокие положительные коэффициенты корреляции (от 0,94 до 0,99) отмечены между Ni, Co и Se, основным источником которых являются дымки Норильского металлургического комбината.

Таблица 5

Корреляционная матрица химического состава сетевых проб аэрозолей Карского и Баренцева морей (сентябрь 1993 г., 49-й рейс НИС «Дмитрий Менделеев»); n = 18 проб, критический уровень коэффициента корреляции на 5% уровне значимости равен 0,468

	Na	Ca	Sc	Cr	Fe	Co	Ni	Zn	Se	Br	Mo	Ag	Sb	Cs	Ba	Hf	Ir	Au	Th
Na	1,00	0,81	0,99	0,59	0,96	0,22	0,41	0,31	-0,05	0,22	0,48	0,89	-0,11	0,99	0,88	0,98	-0,01	0,36	0,98
Ca		1,00	0,88	0,85	0,90	0,02	-0,52	0,68	-0,20	0,64	0,93	0,80	0,12	0,89	0,96	0,89	0,00	0,77	0,90
Sc			1,00	0,65	0,98	0,23	0,45	0,35	-0,05	0,30	0,57	0,91	-0,10	0,99	0,93	0,99	0,01	0,48	0,99
Cr				1,00	0,74	0,05	-0,41	0,74	-0,10	0,89	0,99	0,88	0,12	0,65	0,73	0,67	0,13	0,75	0,70
Fe					1,00	0,31	0,73	0,42	0,04	0,40	0,70	0,89	-0,06	0,99	0,94	0,98	0,01	0,52	0,98
Co						1,00	0,99	-0,16	0,94	-0,10	0,46	0,06	-0,28	0,42	0,42	0,21	-0,06	-0,01	0,20
Ni							1,00	-0,53	0,97	-0,51	-0,36	0,23	-0,56	-0,35	-0,04	-0,09	-0,12	-0,33	-0,12
Zn								1,00	-0,26	0,68	0,89	0,81	0,15	0,34	0,46	0,37	0,06	0,46	0,38
Se									1,00	-0,11	0,14	0,06	-0,23	-0,01	-0,01	-0,07	-0,18	-0,07	-0,06
Br										1,00	0,87	0,85	0,22	0,28	0,43	0,34	0,14	0,82	0,36
Mo											1,00	0,92	0,06	0,57	0,84	0,62	0,98	0,69	0,63
Ag												1,00	0,20	0,93	0,81	0,85	0,80	0,75	0,91
Sb													1,00	-0,01	-0,16	-0,10	-0,10	-0,15	0,16
Cs														1,00	0,93	0,99	-0,02	0,43	0,99
Ba															1,00	0,95	-0,06	0,64	0,95
Hf																1,00	0,03	0,50	0,99
Ir																	1,00	0,06	0,01
Au																		1,00	0,51
Th																			1,00

Чтобы выявить группы генетически связанных между собой элементов, нами был применен факторный анализ [132]. Содержание любого элемента в каждой из проб рассматривается как результат суммарного действия гипотетических источников (факторов). Результаты факторного анализа состава сетевых проб аэрозолей, собранных в сентябре 1993 г. в Карском море, представлены в табл. 6.

Таблица 6

Матрица факторного отображения элементного состава сетевых проб аэрозолей (> 1 мкм), собранных в Карском море в сентябре 1993 г. в 49-м рейсе НИС «Дмитрий Менделеев» (n = 18 проб)

Фактор	I	II	III	IV	V
Доля общей дисперсии, %	77,2%	11,7%	3,2%	2,3%	1,9%
Na	0,05	0,86	-0,45	0,04	-0,16
Ca	-0,06	0,95	-0,03	0,25	-0,19
Sc	0,05	0,90	-0,40	-0,01	-0,14
Cr	-0,05	0,86	0,25	-0,20	-0,01
Fe	0,08	0,93	-0,33	-0,07	-0,06
Co	0,12	0,19	-0,28	-0,05	-0,42
Ni	8,63	0,01	0,03	-0,01	-0,02
Zn	-0,07	0,70	0,90	-0,47	-0,25
Se	0,12	-0,04	-0,20	0,08	0,59
Br	-0,06	0,63	0,55	-0,10	0,04
Mo	-0,04	0,96	0,51	-0,41	0,76
Ag	0,03	1,23	0,46	1,25	0,16
Sb	-0,07	0,02	0,48	0,14	-0,68
Cs	-0,04	0,90	-0,43	0,01	-0,12
Ba	-0,01	0,93	-0,30	-0,18	0,04
Hf	-0,01	0,91	-0,38	-0,06	-0,13
Ir	-0,01	0,15	0,16	0,09	0,16
Au	-0,04	0,67	0,25	-0,11	-0,05
Th	-0,01	0,92	-0,36	-0,03	-0,13

Вклад первого фактора в общую дисперсию основной – он равен 77,2%. Нагрузка Ni на этот фактор аномально высока (8,63), а нагрузки остальных элементов близки к 0. Первый фактор отражает резко контрастную роль источника никеля по сравнению с источниками других элементов. Таким доминирующим источником никеля, определяющим его биогеохимическое поведение в аэрозолях Арктики, является, как отмечалось, антропогенная поставка из района Норильска.

Вклад второго фактора равен 11,7%. Высокую положительную нагрузку (> 0,62) на этот фактор оказывают Na, Ca, Sc, Cr, Fe, Zn, Br, Mo, Ag, Cs, Au, Th, основным источником которых в неводорастворимой фракции аэрозолей является терригенный материал, поступающий из почв и пород суши. Самую низкую нагрузку на второй фактор оказывают Se, Ni, Co, Ir. Основным источником Se, Ni, Co является материал, поставляемый воздушными массами из района Норильска. По геохимическому поведению кобальт близок к никелю [130], содержание кобальта в медно-никелевых рудах месторождений Норильского района сравнительно высоко [133]. Содержание селена в медно-никелевых рудах и в выбросах медно-никелевых комбинатов, как уже отмечалось выше, очень значительно.

Вклад третьего фактора равен 3,2%. Положительную нагрузку (> 0,47) на этот фактор оказывают Zn, Br, Mo, Ag, Sb – элементы, способные накапливаться в растительных волокнах [130], а сильную отрицательную – Na, Sc, Fe, Cs, Ba, Th – элементы, типичные для минеральной фазы.

Вклад четвертого и пятого факторов незначителен (2,3 и 1,9%). Различие нагрузок элементов на эти факторы может быть связано с разнообразием районов, из которых могут поступать как коровые, так и антропогенные аэрозоли.

В целом содержание большинства химических элементов (Na, Al, K, Ca, Sc, Fe, Co, Rb, Zr, Cs, Ba, PЗЭ, Hf, Ta, Th, U) в нерастворимой фракции арктических аэрозолей ниже средних для земной коры значений. Содержание Cr, Cu, Zn, As, Se, Br, Ag, Sb, Au значительно выше их среднего для земной коры, их основной источник – антропогенный. Наиболее существенные источники загрязнения аэрозолей Российской Арктики – горно-металлургические комбинаты Норильска и Кольского п-ва, а также лесные пожары; эпизодически (особенно зимой) ощущается влияние дальнего переноса из Европы, Азии и Сев. Америки.

в. Элементный состав аэрозолей (с учетом морских солей, метод фильтрации)

Элементный состав аэрозолей в целом был изучен параллельно с сетевыми пробами в пробах, отобранных методом фильтрации. При этом изучался состав частиц крупнее 0,5 мкм, в том числе (в отличие от сетевого метода) части морской соли.

В море Лаптевых в июле – сентябре 1995 г. [63, 134] наиболее высокое содержание Na (1230 нг/м³), маркера морских солей, было отмечено, когда судно шло по открытой воде и скорость ветра была довольно высокой (в среднем 11,8 м/с, порывы до 16 м/с). Содержание Sc (маркера вещества суши) в этой пробе тоже относительно высоко (0,009 нг/м³), но морская компонента преобладает. Коэффициент обогащения Na относительно среднего состава земной коры очень высок (135). Вклад частиц морской соли в формирование состава аэрозолей в этом районе очень значителен, как это было ранее показано для других районов океана [70].

Содержание Sc (0,023 нг/м³) – маркера вещества континентов – при относительно низком содержании Na (410 нг/м³) отмечено 5 августа в пробе 6, КО (Fe) и КО (Zn) для этой пробы относительно низки, а содержание и КО для Cr и As высоки. Это сочетание свидетельствует о том, что аэрозоли здесь терригенные, загрязнены Cr и As. Измерение распределения аэрозольных частиц по размерам показало, что содержание частиц крупнее 0,5 мкм было относительно высоко (11,3 см⁻³). Синоптическая ситуация за день до этого характеризовалась поступлением полярных воздушных масс с севера в район Хатанги через Карское море и п-ов Таймыр; 5 августа в 06.00 по Гринвичу поверхностный центр низкого давления располагался под архипелагом Северная Земля. Во время пробоотбора дул сильный (от 13,5 до 15 м/с) юго-восточный ветер. Кроме сухопутного источника, повидимому, еще одним источником минеральных аэрозольных частиц мог быть насыщенный осадочным материалом лед вблизи точки пробоотбора, как это было показано ранее в других районах [135]. Насыщенные осадочным материалом льды широко распространены в Арктике [136–138]. В ARK XI/1 рейсе «Polarstern» пересекал обширное поле «грязного» льда. По спутниковым данным оптического сканера AVHRR, установленного на борту спутника NOAA, в конце июля 1995 г. площадь, покрытая грязным льдом только в море Лаптевых, составляла 24 000 км² [139].

Максимальные содержания и КО антропогенных элементов в аэрозолях моря Лаптевых отмечены в пробе 4. Содержание как терригенного (Sc, 0,0016 нг/м³), так и морского (Na, 240 нг/м³) вещества в этой пробе низкое по сравнению с другими пробами (0,0016 и 240 нг/м³), а КО для Fe, Co, Cr, Zn – наиболее высокие из отмеченных в

данной экспедиции. Во время отбора этой пробы дул слабый (5,5 м/с) южный – юго-восточный ветер. Содержание аэрозольных частиц крупнее 0,5 мкм было низким (1,26 см⁻³). Низкие содержания Sc, Na и аэрозольных частиц крупнее 0,5 мкм свидетельствуют о том, что антропогенные элементы содержатся, главным образом, в тонкой фракции. Существуют два наиболее вероятных источника этих тонких частиц: 1) генерация солевых аэрозольных частиц при разрушении пузырьков в поверхностном микрослое морской воды; 2) дальний перенос мелких частиц из районов с открытой поверхностью морской воды. Коэффициент обогащения Na в пробе 4 высок и свидетельствует о преимущественно морском происхождении этих аэрозолей. Как отмечалось ранее, частицы морской соли обогащены многими микроэлементами в результате фракционирования в поверхностном микрослое морской воды [62, 70].

Средние значения содержания химических элементов в аэрозолях над морем Лаптевых сопоставлены нами с литературными данными в табл. 7. Средние значения для Na (494 нг/м³) близки к содержанию Na в аэрозолях пролива Фрама близ кромки ледового поля [135] и намного выше, чем в покрытой многолетними льдами центральной Арктике [135], на арктических островах [11, 78] и в Антарктике [140]. Основная причина высокого содержания Na и других элементов морских аэрозолей состоит в том, что пробы были отобраны в море Лаптевых летом, когда открытая вода занимала существенную часть поверхности [146].

Среднее содержание Sc в аэрозолях моря Лаптевых, по нашим данным, равно 0,0081 нг/м³, что выше, чем в ряде других районов Арктики и в Антарктике (см. табл. 7). Рост содержания скандия, типичного терригенного элемента, связан с близостью суши, свободной в это время от снега, реже – с ресуспензией минерального материала из «грязного» льда, а также с поступлением продуктов сгорания угля и нефти.

Содержание химических элементов в аэрозолях Карского моря в сентябре 1993 г. было одного порядка с их содержанием в других районах Арктики или ниже (см. табл. 7). Оно резко (на один-два порядка) ниже, чем обычно в Арктике в конце зимы – начале весны [147–148]. Оно на один-два порядка ниже, чем над Черным и Средиземным морями (влияние аридной зоны и индустриальной нагрузки) [145, 150, 151]. Таким образом, воздух в рассматриваемом районе Арктики можно считать относительно чистым. Еще ниже содержание микроэлементов в воздухе Антарктики [140, 152], что объясняется удаленностью Антарктиды от большинства источников естественного и антропогенного аэрозоля.

Как и для сетевых проб, высокое содержание Se в пробах на фильтрах Whatman-41 и высокие КО обнаружены в пробах 7–9 (Енисейский залив при переносе воздушных масс со стороны Норильска) [22]. Для этих проб также отмечены наиболее высокие КО для Co. Эти результаты наряду с данными сканирующей электронной микроскопии, микронзондового анализа и элементного состава нерастворимых аэрозолей свидетельствуют о существенном загрязнении морских аэрозолей даже на значительном (> 300 км) удалении от Норильска.

В качестве дополнительного индикатора антропогенных аэрозолей мы определили характерные для разных источников отношения элементов трассеров (Zn/Sb, As/Sb, Se/Sb), использование которых было предложено К. Раном и Д. Лоуенталем [153, 154]. При использовании метода обратных траекторий переноса воздушных масс

[11, 78, 155] удается разделять эти источники и их конкретный вклад в состав аэрозолей. Полученные нами величины Zn/Sb и Se/Sb для аэрозолей Карского моря на порядок выше литературных оценок аэрозолей Нориль-

ского региона. Одной из основных причин такого отличия, по-видимому, являются недостаточно надежные определения элементного состава аэрозолей Норильского региона, особенно для Sb, Se, As.

Т а б л и ц а 7

Сравнение содержания химических элементов в аэрозолях Арктики и других частей Мирового океана, нг/м^3 (средние значения)

Район, время	Количество проб, л	Na	Ca	Sc	Cr	Fe	Co	Ni	Zn	As	Se	Br	Rb	Sb	Источник
Море Лаптевых, июль–сентябрь 1995 г.	12	494		0,0081	3,97	142	0,102		15,4	0,38		1,74			Данная работа
Карское море, сентябрь 1993 г.	14	24,9		0,00022	0,044	2,81	0,0041		1,58		0,049			0,0032	[22]
Желоб Св. Анны и Баренцево море, август–октябрь 1994 г.	10	1760	283	0,0033	5,66	135	0,30	8,2	43	0,15		0,1		0,064	[26]
Норвежское и Гренландское моря, июль–август 1996 г.	5	1517	155	0,026	0,665	800		19,1	34,2	0,64	0,28	0,5	0,87	0,098	Данная работа
Пролив Фрама, июнь–июль 1997 г.	8	415	9,2		0,56	57		11,1	18,8	0,08	0,3	0,044	1,11	0,16	Данная работа
Центральная Арктика, август–октябрь 1991 г.	7	20	3	<0,003	<1,1	5,9	0,019	<0,18	0,18	0,022	<0,2	0,25	0,042	0,019	[135]
Пролив Фрама, август–октябрь 1991 г.	3	490	23	<0,004	<1	10,6	0,014	<0,2	0,19	<0,06	0,088	1,26	0,052	<0,005	[135]
Северная Земля, апрель–май 1985, 1986 и 1988 гг.	22	90	180	0,014	1,6	30	0,075	6,2	5,6	1,8	0,3	4,1		0,19	[11]
Шпицберген, Ни-Алезунд, лето 1984 г.	13	66	7,3	0,0012	0,56	5,6	<0,004	<0,2	<0,15	0,01	0,035	0,73	<0,08	0,0024	[78]
Шпицберген, Ни-Алезунд, зимы 1983, 1984 и 1986 гг.	46	230	34	0,0043	<0,4	17,8	0,0096	0,29	3,9	0,52	0,156	8,8	0,083	0,092	[78]
Канадская Арктика, ст. Алерт, март 1985 г.	12	234,5	62,6	0,01		50	0,032		8,5	0,349	0,081	18,5		0,06	[141]
Аляска, м. Барроу, март–апрель 1986 г.	280	240	53			38		4	11			25			[142]
Гренландия, станция Самит (3170 м), июнь–август 1990 г.	29	4,3	16	0,003		9,8	0,011		1,5	0,029	0,02	0,95			[143]
Северное море, о. Хельголанд, 1986–1990 гг.	85								99	8	2,4			1,8	[144]
Черное море, западная часть, июнь–сентябрь 1988 г.	14	1400		0,08	9	420	0,25	4,9	46	1,1	0,73	0,02	1,6	0,6	[145]
Антарктика		3,3		0,00016	0,04	0,62	0,00049		0,033						[140]
Район, время	Количество проб, л	Cs	Ba	La	Ce	Nd	Sm	Eu	Yb	Lu	Hf	Au	Th	U	Источник
Карское море, сентябрь 1993 г.	14											0,0029			[22]
Желоб Св. Анны и Баренцево море, август–октябрь 1994 г.	10	0,016	0,89	0,064	0,11	0,035	0,0091	0,0021	0,0026	0,0004		0,0026		0,041	[26]
Норвежское и Гренландское моря, июль–август 1996 г.	5	0,032	3,39	1,94	2,49	0,46	0,07	0,017	0,026	0,004	0,088		0,046	0,53	Данная работа
Пролив Фрама, июнь–июль 1997 г.	8	0,023	2,03	0,21			0,011	0,0018	0,009	0,0012	0,01		0,0083	0,21	Данная работа
Центральная Арктика, август–октябрь 1991 г.	7	<0,04	<4	<0,013	<0,3		0,0005	<0,01		<0,006			<0,03		[135]
Пролив Фрама, август–октябрь 1991 г.	3	<0,04	<5	<0,03	<0,3		<0,003	<0,016		<0,007			<0,035		[135]
Северная Земля, апрель–май 1985, 1986 и 1988 гг.	22						0,01			0,064	0,066	0,018			[11]
Шпицберген, Ни-Алезунд, лето 1984 г.	13	0,003	<0,7	0,0055	<0,02		0,00072	<0,001		<0,0004			0,0017		[78]
Шпицберген, Ни-Алезунд, зимы 1983, 1984 и 1986 гг.	46	0,0089	<1,5	0,0137	<0,05		0,003	0,00116		<0,0028			0,0037		[78]
Канадская Арктика, ст. Алерт, март 1985 г.	12			0,029	0,047		0,004						0,0042		[141]
Черное море, западная часть, июнь–сентябрь 1988 г.	14	0,17	4,5	0,37	0,74		0,04	0,01	0,02				0,11		[145]

Сравнение КО аэрозолей, собранных сетевым методом (нерастворимые частицы крупнее 1 мкм) и фильтрацией через фильтры Whatman-41 в Карском море в 49-м рейсе НИС «Дмитрий Менделеев» (сентябрь 1993 г.) и через фильтры АФА-ХА в 9-м рейсе НИС «Профессор Логачев» (август–октябрь 1994 г.)

Метод	Значение	Элемент										
		Na	Cr	Fe	Co	Ni	Zn	Se	Br	Mo	La	Au
49-й рейс НИС «Дмитрий Менделеев»												
Сети	среднее	0,65	9,5	2,79	12	–	101	3430	34	42	–	14000
	стандарт. отклон.	0,29	5,4	1,13	18	–	99	5750	20	24	–	11480
Фильтры	среднее	152	62	7,9	15	–	3550	108800	9560	3050	–	43300
	стандарт. отклон.	148	51	6,1	15	–	3290	84200	12210	5070	–	35300
9-й рейс НИС «Профессор Логачев»												
Сети	среднее	1,1	40	3,9	5,1	6,1	198	–	13	–	2	5750
	стандарт. отклон.	1,8	23	1,4	4,7	10,3	170	–	13	–	1	3140
Фильтры	среднее	785	470	16	90	1320	5060	–	420	–	15	5060
	стандарт. отклон.	1200	300	8	116	2630	3700	–	680	–	17	6210

Большой интерес представляет сравнение средних величин КО аэрозолей, собранных сетевым методом и параллельно фильтрацией через фильтры Whatman-41 (табл. 8). Видно, что для большинства элементов КО фильтрационных проб на 1–2 порядка выше, чем сетевых. Это доказывает то, что такие элементы в основном связаны с субмикронными частицами, которые слабо улавливаются сетями. Исключение составляет Co, для которого средние величины КО для обоих методов пробоотбора почти совпадают. Выше было показано, что сферы сгорания размером от 0,2 до 10 мкм могут быть обогащены рядом элементов, что подтверждается и изучением химического состава различных по размерам фракций аэрозолей. Показано, что концентрации многих микроэлементов выше в самых мелких фракциях [156–158]. Таким образом, гранулометрический состав аэрозолей становится одним из важнейших факторов, определяющих их химический состав, что соответствует и данным по водной взвеси, кризолям и донным осадкам.

В районе желоба Святой Анны и в Баренцевом море в августе–октябре 1994 г. в 9-м рейсе НИС «Профессор Логачев» было отобрано 10 проб фильтрацией воздуха через фильтры АФА-ХА-20 [25, 26]. Содержания почти всех элементов (кроме брома и меди), полученные нами, выше, чем в работе [78] для Шпицбергена (на расстоянии около 1 км от берега). Более того, наши данные превосходят даже весенние значения, полученные в период максимальной загрязненности арктической атмосферы [11]. Лишь содержание As, Sb и Au, а также уже упомянутых Br и Cu на Северной Земле было выше. Изменчивость элементного состава аэрозоля от пробы к пробе была очень велика: величины средних квадратичных отклонений от средних значений концентраций составили около 100% почти для всех элементов. В данном случае это отражает не только временную, но и пространственную изменчивость полей концентраций элементов, так как место отбора проб менялось в соответствии с маршрутом судна.

Коэффициенты обогащения большинства элементов в аэрозоле над желобом Святой Анны и Баренцевым морем (рис. 9) по порядку величин близки к средним, полученным для арктических островов [26].

Данные по КО (рис. 9) и результаты парного корреляционного анализа позволяют разделить химические элементы на 3 группы: 1) характерные для земной коры (Sc, редкоземельные элементы, Th); 2) морские (Na и Br); 3) смешанного морского, терригенного и антропогенного происхождения (As, Ni, Cu, Se, Fe, Co, Zn). Сравнительно высокие КО редкоземельных элементов в фильтрационных

пробах (10–15) связаны, вероятно, как с тем, что аэрозоли, отобранные фильтрацией, состоят в основном из морской соли, для которой характерны высокие концентрации этих элементов [62, 156], так и с особенностями состава почв на прилегающих к району наблюдений участках суши, в частности на Кольском п-ове.

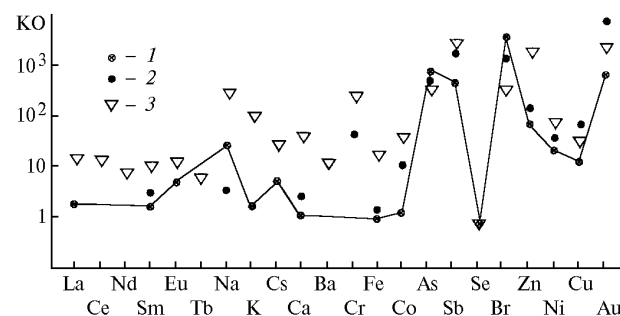


Рис. 9. Коэффициенты обогащения проб аэрозолей, собранных методом фильтрации в Арктике: 1 – Баренцево море и желоб Святой Анны, август–сентябрь 1994 г. (9-й рейс НИС «Профессор Логачев»); 2 – архипелаг Северная Земля, весна 1985, 1986 и 1988 гг. [147]; 3 – о-в Шпицберген, зима 1983–1984 гг. [78]

Высокое значение коэффициента корреляции между содержанием Br и Na ($n = 9$ проб; $r = 0,978$, а для 1% уровня значимости критическое значение коэффициента корреляции для 9 проб равно 0,798) свидетельствует о том, что основным источником Br в аэрозолях Арктики в периоды наших исследований являлась морская соль.

Значительное обогащение аэрозоля Ni (см. рис. 9), на наш взгляд, связано не только с его атмосферным заносом из районов Норильска и Кольского п-ва, но и с фракционированием его при выносе из морской воды в атмосферу [62, 156]. На это указывают высокие коэффициенты корреляции Ni и Na.

Как и для аэрозолей Карского моря (сентябрь 1993 г.), в желобе Святой Анны и в Баренцевом море (август – октябрь 1994 г.) КО фильтрационных проб оказались выше, чем сетевых (см. табл. 8). Объяснялось это тем, что при фильтрации собираются субмикронные частицы аэрозолей, обогащенные многими химическими элементами, в том числе морская соль.

В Норвежском и Гренландском морях, а также в западной части Баренцева моря состав аэрозолей изучен в июле – августе 1996 г. во время 15-го рейса НИС «Профессор Логачев» (см. рис. 1). Среднее содержание ти-

пично морского элемента Na и типично терригенного Sc было высоким (1517 и 0,0026 нг/м³ соответственно) (см. табл. 7). КО свидетельствуют о том, что основным источником большинства элементов является морская соль. Однако для Ni, Zn, As, Se, Sb главный источник – антропогенный. Индикаторные отношения Zn/Sb и As/Sb показывают, что этот источник расположен в Скандинавии.

Средний вклад поступающих в опорные пункты наблюдений на Земле Франца-Иосифа, на архипелаге Северная Земля и на о. Врангеля воздушных масс различного происхождения, а также распределения (через 5 сут) уходящих воздушных масс приведен в работе [159]. Оценка переноса вещества по рассмотренным траекториям производилась для шести маркерных антропогенных элементов, пространственное распределение мощностей выбросов которых известно [160, 161]. Следует иметь в виду, что антропогенные загрязнения могут поступать в пункты наблюдений не только с материков, но и из Арктики, где, за счет большого времени жизни примесей, зимой и весной происходят их перемешивание и перераспределение [50].

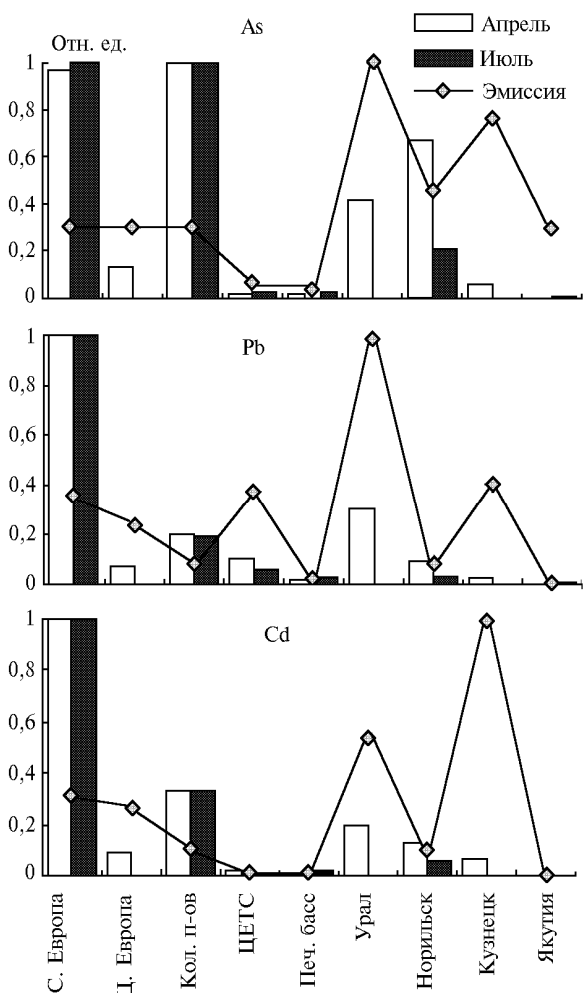


Рис. 10. Вклады промышленных регионов в загрязнение мышьяком, свинцом и кадмием атмосферы на Земле Франца-Иосифа, а также соотношение мощностей выбросов этих элементов регионами-источниками [162]

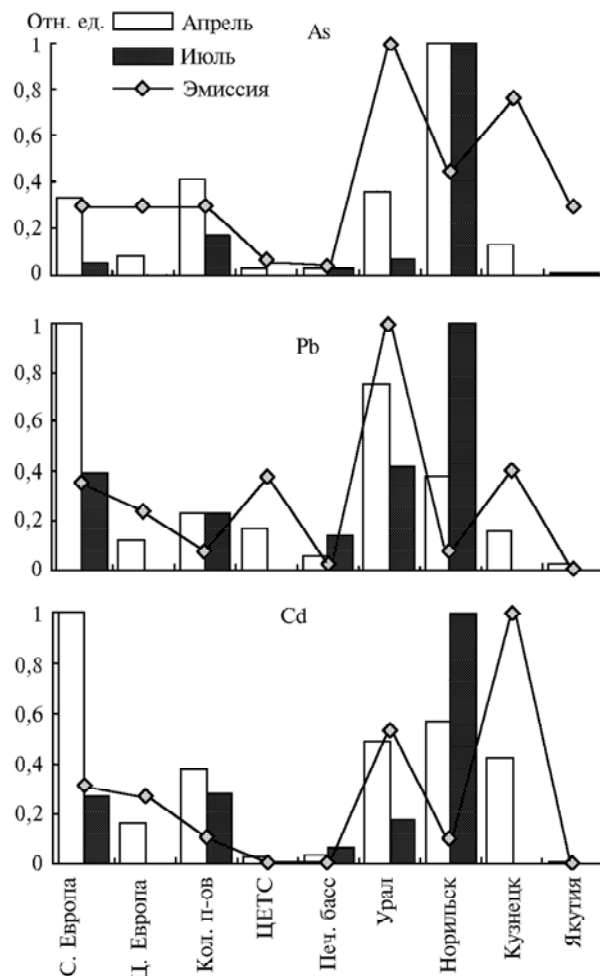


Рис. 11. Вклады промышленных регионов в загрязнение мышьяком, свинцом и кадмием атмосферы на Северной Земле, а также соотношение мощностей выбросов этих элементов регионами-источниками [162]

Ранее была описана методика оценок вкладов отдельных промышленных регионов в содержание конкретных антропогенных примесей в атмосфере пунктов наблюдений [49]. На рис. 10 и 11 приведены соотношения вкладов регионов-источников в концентрации As, Pb, Cd [162]. Как было показано в [49], из-за сходства в пространственных распределениях эмиссии, зависимости для Ni и As, V и Pb, Zn и Cd попарно аналогичны. При этом вклад каждого источника пропорционален мощности выбросов данной примеси конкретным регионом и функции, значения которой различны для каждой пары «источник – пункт наблюдений» и определяются синоптическими и метеорологическими параметрами атмосферы на пути следования воздушных масс между этими пунктами. Подчеркнем, что наиболее загрязняющий источник может не быть самым мощным эмиттером. Все это зависит от положения пункта наблюдений и от конкретной рассматриваемой примеси.

В табл. 9 приведены средние (апрель и июль) концентрации шести антропогенных химических элементов на Земле Франца-Иосифа и Северной Земле, оцененные по данным [160, 161] о мощностях индустриальных выбросов

этих элементов рассматриваемыми регионами-источниками с поправкой весенних результатов на вклад арктического воздуха [162]. Отсутствие данных об атмосферных выбросах антропогенных загрязнений с американского материка не позволило сделать аналогичные оценки для о. Врангеля. Учитывая, что летом содержания

рассматриваемых элементов в аэрозолях Арктики примерно в 10–50 раз ниже, чем зимой и весной [78], можно сделать вывод, что примененная простая модель для оценок средних концентраций антропогенных составляющих позволяет обнаружить реальные различия в уровнях загрязненности арктической атмосферы для разных сезонов.

Таблица 9

Средние концентрации шести антропогенных химических элементов в атмосфере Земли Франца-Иосифа и Северной Земли, нг/м^3

Пункты наблюдений	Источники данных	As	Ni	Pb	V	Zn	Cd
Земля Франца-Иосифа	зима-весна [163]	0,15–0,52	0,1–2	0,5–16	0,09–2,8	2–20	0,12–0,8
	расчетные данные	0,26	0,85	3,3	0,85	1,9	0,08
	апрель июль	0,007	0,022	0,09	0,021	0,056	0,002
Северная Земля	весна [11]	0,26–1,8	1,1–11	3,5	0,73–0,8	0,6–13	0,09
	расчетные данные	0,19	0,65	1,9	0,46	1,1	0,048
	апрель июль	0,019	0,063	0,1	0,02	0,04	0,0026

Как видно из табл. 10, в течение 5 сут часть воздуха (и, соответственно, загрязнений) из пунктов наблюдений уносится на материк или в океаны. Это можно рассматривать как один из каналов самоочищения арктической атмосферы. Проведенный впервые статистический анализ пространственного распределения воздушных масс через 5 сут после их прохождения через пункты наблюдений позволил оценить средний (для каждого из рассматриваемых месяцев) баланс пассивных примесей для каждого пункта (рис. 12) [159]. Весной всего 20% антропогенных примесей, проходящих через Российскую Арктику, уходит затем за пределы Арктического региона и оседает на подстилающую поверхность южнее 70° с.ш. Почти столько же (18–27%) остается в арктической атмосфере, перераспределяясь в ней и загрязняя ее по всему пространству, что подтверждает неоднократно отмечавшиеся ранее явления накопления и перемешивания атмосферных загрязнений в Арктике, как в большом резервуаре (характерно для зимнего и весеннего сезонов).

Таблица 10

Распределение пассивной примеси через 5 сут после прохода через пункты наблюдений, доли %

Месяц	Пункты наблюдений	Ушло на материк	Осело в Арктике	Осталось в арктической атмосфере	Ушло в океан
Апрель	Земля Франца-Иосифа	20	62	18	0
	Северная Земля	19	54	27	1
	о-в Врангеля	21	38	19	22
Июль	Земля Франца-Иосифа	1	98	1	0
	Северная Земля	4	93	3	0
	о-в Врангеля	1	92	1	6

Из р-на о. Врангеля 22% примесей уходят весной в северную часть Тихого океана, где в районе арктического фронта происходит их вымывание на поверхность океана. Летом почти все пассивные примеси (более 90%), проходящие через Российскую Арктику, оседают затем в той или иной части Арктического региона.

Количество аэрозольного материала в атмосфере очень изменчиво – на протяжении нескольких часов или суток оно может меняться в десятки и сотни раз. Поэтому

для характеристики воздушных масс более показательными оказываются не содержание, а другие маркеры – минеральный, химический и изотопный состав аэрозолей, состав биогенных остатков.

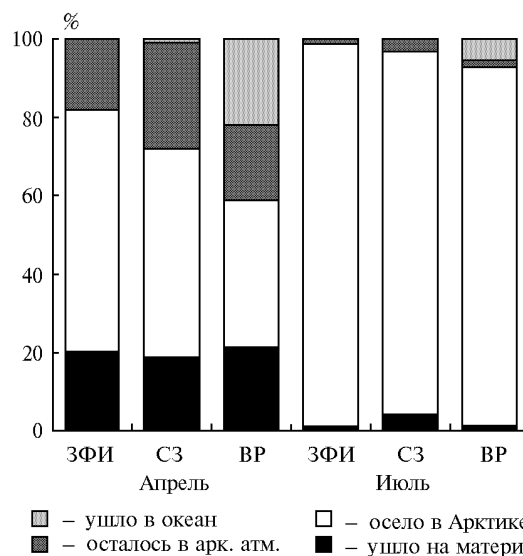


Рис. 12. Средний баланс пассивных примесей после прохождения через пункты наблюдений

При пересчете на объем воздуха данные и по этим характеристикам также оказываются очень изменчивыми, поскольку подсчет идет на объем воздуха. Более показательными они становятся при пересчете на вещество (в процентах от сухого вещества аэрозоля). Наряду с КО и коэффициентами корреляции (КК) в последние годы для этих целей используют также отношения элемент/элемент-индикатор терригенного вещества (чаще всего Al, Sc, Ti) и элемент/элемент индикатор морской соли (чаще Na, Cl), а также сопоставления по группам элементов (минералов), корреляционный анализ. В результате такой обработки (как и для водной взвеси, донных осадков) удастся выявлять питающие провинции (источники), провинции атмосферы, депоцентры – главные области выпадения аэрозолей данного состава и др. Методом отношений между элементами удастся опре-

делить источники загрязнений. Очень показательными являются отношения к Sb (табл. 11). Для северного полушария удалось по этому показателю выделить по крайней мере 14 регионов-источников загрязнений атмосферы. Таким образом, химический состав, в том числе и элементы загрязнений, а также радиоактивные изотопы [1, 164] могут служить трассером мест возникновения и перемещений воздушных масс (метод элементов-маркеров в дополнение к методу минералов-маркеров), и наоборот, изучение полей природных минералов и элементов позволяет

предсказать вероятное распространение их антропогенных аналогов. Зная обычное для земной коры отношение эл./Al или эл./Sc, можно определить для проб аэрозоля содержания элементов сверх этого обычного фонового соотношения (эксцессные содержания элементов). Такие подсчеты сделаны для V – характерного элемента загрязнений, связанных с сжиганием угля и нефтепродуктов (рис. 13) [165]. Содержание V_{эксц} в Арктике максимальных значений достигает зимой, четко видны особый характер зимних выпадений и их отличие от летних.

Таблица 11

Отношения концентраций элементов-трассеров в выбросах ряда промышленных регионов-источников Арктики и других регионов [11]

Регион	Отношения концентраций элементов							
	As/Sb	Se/Sb	V/Sb	Zn/Sb	Mn/Sb	Cr/Sb	Ni/Sb	Pb/Sb
Кольский п-ов	7,2	1,1	5,3	7,8	4,6	5,3	28	32
Печорский бассейн	0,96	1,8	5,5	4,7	6,2	6,8	6,1	17
Норильск	9,8	1,3	5,2	10,5	1,1	1,2	37	30
Урал	5,9	1,9	32	42	12	15	17	101
Якутия	1,6	2,2	5,0	6,5	10,5	12	8	32
Кузнецк	18	2,5	6,6	390	16	19	5,8	160
Донецк	1,1	2,0	17	44	19	18	8,9	59
Байкал	5,0	1,5	3,0	8,0	3,5	3,7	4,5	65
Европа без СССР	12	1,0	77	200	36	39	33	260
АОН	35	1,5	140	270	86	89	75	550
Восточное побережье США	0,74	1,0	26	28	3,4	–	–	–
Средний Запад США	2,6	4,4	1,5	46	12	–	–	–
Великобритания	4,1	0,9	52	87	26	28	22	250
Скандинавия	24	1,5	220	460	47	49	72	640

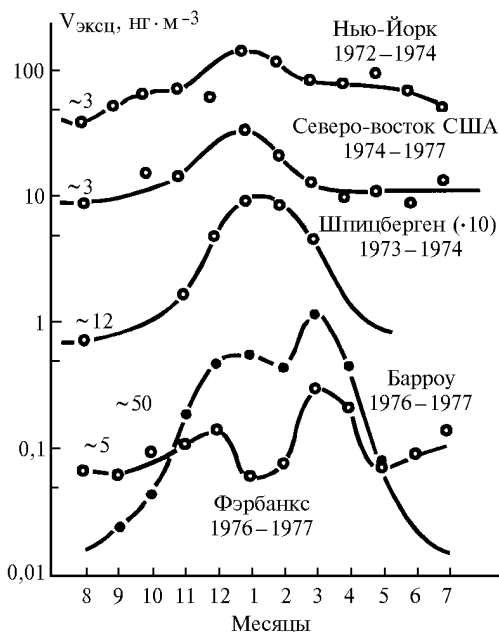


Рис. 13. Сезонная изменчивость эксцесса (превышение над расчетной концентрацией терригенной составляющей) ванадия, индикатора переноса загрязнений, в Арктике в сравнении с северо-восточной частью США и Нью-Йорком [165]

По этим и другим данным видно, что каждый промышленный центр имеет свой специфический спектр загрязнений, «свое лицо». Эти загрязнения, добавляясь к глобальному силикатному веществу и органике аэрозоля, маркируют его и являются важными трассерами воздушных масс. Таким образом, по вещественному составу аэрозолей можно вос-

становить историю возникновения аэрозолей и их пребывания в атмосфере.

Конкретные для воздушных масс пути движения – от мест образования аэрозолей до мест их частичного или полного выпадения – удалось восстановить в Арктике при сопряженном анализе вещества аэрозолей, коллекции метеокарт и построения обратных траекторий переноса воздушных масс. Для длительных отрезков времени – сезоны года, годы – такие «трассы» перемещения осадочного вещества в атмосфере восстанавливаются по анализу обратных траекторий, а для еще более длительных отрезков времени с контролем: сопоставлением с данными по аэрозолям, снегу, ледникам, взвесям, кризолям, донным осадкам озер и морей. Это направление «седиментационной и геохимической метеорологии» пока еще только развивается.

Очень важны количественные характеристики процессов переноса аэрозолей, а также процесса их выпадения: определение вертикальных потоков аэрозоля, минералов, химических элементов и загрязнений.

2.6. Потоки аэрозолей и связанных с ними загрязнений

На основании данных по количественному содержанию и гранулометрическому составу могут быть определены значения вертикальных потоков аэрозолей, оседающих на поверхность моря или суши. Как было показано, на удалении от берегов гранулометрический состав аэрозолей меняется очень мало (см. рис. 4), что упрощает определение значений вертикальных потоков. Данные по минеральному и химическому составу, по загрязнениям аэрозольного вещества, приведенные выше, могут быть пересчитаны в значения вертикальных потоков как аэрозо-

лей в целом, так и различных минералов и химических элементов (загрязнений).

Этот вычислительный метод, сопряженный с рядом допущений, дает ориентировочные значения потоков. Он может быть в нужных случаях дополнен и проверен прямыми определениями потоков, которые выполняются при изучении толщи снега (определение потоков для всего времени существования снегового покрова), льда, донных осадков, а также определениями с помощью различных осадкомеров, специальных бассейнов, заполненных водой и др. Кроме того, за последние годы все большее развитие получают методы изотопного анализа потоков (^{210}Pb , ^7Be и другие космогенные изотопы).

Знание потоков (а не только количества в кубическом метре воздуха) дает конкретные для данного места и данной синоптической ситуации значения, что особенно важно при изучении режима выпадения загрязнений и, очевидно, в будущем станет основой для экологических исследований и мониторинга.

Потоки олового материала, поступающего на поверхность морей Российской Арктики за счет сухого осаждения, были рассчитаны нами с допущением того, что скорость осаждения нерастворимых крупных (> 1 мкм) частиц, составляющих главную по массе часть аэрозолей (см. выше), равна 2 см/с [166]. Величины потоков для Арктики составляют от $0,03$ до $1,68$ мг·м $^{-2}$ ·сут $^{-1}$ (в среднем $0,39$ мг·м $^{-2}$ ·сут $^{-1}$ или 142 мг/м 2 /г., стандартное отклонение равно $0,34$ мг·м $^{-2}$ ·сут $^{-1}$).

Рассчитаем величину потока нерастворимых аэрозолей в год, допуская, что сухое осаждение составляет $1/4$ суммарного [5]. Наши летние данные по содержанию аэрозолей мы распространяем на год, учитывая, что летом содержание аэрозолей в несколько раз ниже, чем в зимние и весенние месяцы [9, 117, 125, 149], но количество атмосферных осадков летом в 3–4 раза выше, чем весной [2, 167]. Рассчитанный с этими допущениями поток олового взвеси равен 570 мг·м $^{-2}$ ·г $^{-1}$ ($1,56$ мг·м $^{-2}$ ·сут $^{-1}$).

Поток олового материала на поверхность дрейфующих льдов Арктики определяется независимо – по среднему содержанию взвеси в свежеснежавшем снеге, равному $2,19$ мг/л (среднее из работ [34, 52, 168–171], $n = 87$ опре-

делений), и среднегодовому количеству атмосферных осадков в Северном Ледовитом океане 285 мм [172]. Поток по этим прямым определениям равен 624 мг·м $^{-2}$ ·г $^{-1}$ ($1,71$ мг·м $^{-2}$ ·сут $^{-1}$).

Поток олового материала, измеренный в 1994 г. на станции Ни-Алезунд на Шпицбергене еще одним независимым методом (с помощью осадкомера), составлял 212 мг·м $^{-2}$ ·сут $^{-1}$ ($0,58$ мг·м $^{-2}$ ·сут $^{-1}$) [53].

Среднее для трех независимых методов значение вертикального потока аэрозолей в Арктике составляет около 300 мг/м 2 /г., что значительно выше, чем считалось ранее. Эта цифра, безусловно, требует дальнейшего уточнения.

2.7. Вклад аэрозолей в формирование природной среды Арктики

Приведенные данные показывают, что вклад аэрозолей в формирование природной среды Арктики значительнее и разнообразнее, чем это представлялось ранее. Прежде всего это касается общего количества аэрозольного материала и его распределения по сезонам года. Общее поступление аэрозолей (нерастворимая часть) в Северный Ледовитый океан (площадь $13,1$ млн. км 2) по разным оценкам колеблется от $2,8$ млн. т (определение с помощью осадкомера на Шпицбергене) [53] до $7,5$ – $8,2$ млн. т по данным наших исследований, а также по определению содержания взвеси в снеговом покрове (табл. 12). Это много ниже, чем поставка речного материала в Арктику (около 245 млн. т/год) [4, 36]. Однако следует иметь в виду, что главная часть речных взвесей осаждается в маргинальных фильтрах на границе река – море [173, 174]. За пределы фильтра проникает только около 7% , а области континентального склона достигает около 5% , т.е. за пределы фильтра проникает только 12 млн. т взвеси. Вклад олового материала в формирование геохимического и минерального облика водной взвеси, криозоля морских льдов и донных осадков Арктики приблизительно равен вкладу взвешенного материала рек и материала морских льдов [175]. Очень большое значение имеет также и поступление из атмосферы органического вещества.

Таблица 12

Поставка взвеси в бассейн Северного Ледовитого океана

Способ поставки	Методы получения данных	Потоки из атмосферы, мг·м $^{-2}$ ·сут $^{-1}$	Поставка, млн. т·год $^{-1}$	Источник
Оловый перенос	Данные сетевых проб	1,56	7,5	Данная работа [34, 137, 168–171] [53]
	Содержание взвеси в снежном покрове	1,71	8,2	
	Данные осадкомеров	0,58	2,8	
Речной сток (до маргинального фильтра)	–	–	245	[4, 36]
Ледовый перенос из моря Лаптевых	–	–	4	[138]

Изучение минерального и химического состава аэрозолей Арктики позволило нам разделить их на три главные природные группы.

1. Группа элементов, связанных с растительной органикой (C, S, H, N, P и др.).

2. Группа элементов земной коры – с отношениями, типичными для матрицы земной коры (Al, Si, Fe, Ca, Mg, Ni и др.).

3. Группа элементов, связанных с морской солью – с отношениями, типичными для матрицы морской воды (Na, Cl, Br, S, Ca, Mg и др.).

Обычно аэрозоли представляют смеси этих трех природных групп элементов, соотношения между которыми меняются в пространстве и во времени. Особняком стоит группа антропогенных элементов (загрязнений). Их содержания ($KO > 10$) нигде над морями Арктики не

достигает опасных значений. Они служат маркерами дальнего и сверхдальнего переноса аэрозолей из промышленных регионов умеренной зоны.

При слабом воздействии антропогенного фактора в Арктике очень четко выявляется глобальный аэрозольный фон (см. рис. 1). Он определяется в основном аллюмосиликатами (матрица земной коры), к которым в летнее время добавляются еще морская соль и растительные остатки с суши. Глобальный аэрозоль имеет достаточно постоянный гранулометрический и минеральный состав.

Для экосистем Арктики огромное значение имеет аэрозольная поставка биогенных элементов (P, N, S, H), а также железа и ряда других элементов, необходимых для жизни, поскольку их поступление с речным стоком здесь незначительно. Аэрозоли регулируют первичную продукцию Арктики, биогеохимические процессы не только в море, но в значительной мере и на суше (в условиях мерзлоты азотобактер не развивается, чем обусловлен дефицит азота) – бескорневое, т.е. исключительно атмосферное, питание лишайников.

Все сказанное приводит к заключению, что реальная роль аэрозолей в Арктике недооценивалась и необходимы еще новые исследования с применением нестандартных подходов.

Выводы

1. В ходе десяти морских экспедиций в Арктику удалось получить представительный материал по аэрозолям приподнятого слоя, который дополнен исследованиями на арктических островах.

2. Применение нескольких взаимно дополняющих методов изучения аэрозолей, а также использование данных по изучению снега на поверхности льдов и морских льдов позволило определить количественное содержание и потоки аэрозольного материала Арктики вплоть до Северного полюса, его гранулометрический, минеральный и химический состав, определить виды загрязнений и районы их поступления. Выявлены и применены многочисленные маркеры аэрозольного материала, использование которых позволяет определить области его захвата с поверхности, траектории переноса и участки отложения (депоцентры).

3. Коренным отличием эолового материала в Арктике является то, что главная его «поставка и разгрузка» идут не летом, а зимой, когда поверхность питающих провинций (зоны тайги и тундры) скрыта слоем снега и скована льдом. Главное значение имеют аэрозоли дальнего и сверхдальнего происхождения (особенно зимой) – об этом свидетельствуют многочисленные маркеры.

4. Разгрузка аэрозолей в арктических морях и в Центральной Арктике идет не на водную поверхность, как в других зонах, а со снегом большую часть года (300–360 сут) на поверхность льдов. В зоне паковых льдов типична круглогодичная аккумуляция эолового материала на льдах на протяжении 3–15 лет.

5. Разгрузка аэрозолей в области паковых льдов идет в местах таяния льдов – в северной части Гренландского моря. Арктика таким образом является гигантским природным сборником эолового вещества и связанных с ним загрязнений, которые поступают сначала в льды, т.е. превращаются в криозоли, а затем в местах таяния льдов в воду на многие тысячи километров от мест их выпадения.

6. Балансные подсчеты, полученные на основе наших определений, показывают, что вклад аэрозолей в формирование осадочного материала в Арктике близок к вкладу речного осадочного вещества – за пределами маргинальных фильтров рек (ранее эоловый материал в Арктике не принимался в расчет). Для многих элементов (Pb, Sb, Se, V и др.) аэрозольный источник – главный.

7. Велика роль эолового материала в поставке органического вещества и биогенных элементов в моря Арктики, известные дефицитом биогенов. По нашим данным, эоловый материал, вымываемый снегом и дождем, обеспечивает большую часть элементов, необходимых для формирования первичной продукции планктона Арктики.

8. На основании геохимических исследований и изучения загрязнений удалось выявить главные точечные и локальные источники загрязнений (Норильск, Кольский п-ов, нефтяные факелы Западной Сибири). Удалось по соотношениям элементов установить «лицо» загрязнений из каждого источника (из крупнейших промышленных областей), проследить конкретные траектории происхождения воздушных масс в Арктике и связанных с ними конкретных загрязнений, места главной разгрузки воздушных масс (депоцентры), сезонный ход процессов.

9. Наш опыт показывает, что наряду с всесторонним изучением эолового материала из атмосферы крайне необходимы систематические исследования литологии и геохимии снежного покрова (в Центральной Арктике он удерживается 9–10 мес) – естественного коллектора как растворенного, так и взвешенного эолового материала. Необходимы также соответствующие исследования по литологии и геохимии морских льдов, на поверхность которых выпадает, а затем и концентрируется эоловый материал. Таким образом, изучение вещества атмосферы становится системным и многодисциплинарным, что резко увеличивает возможности интерпретации.

По многим разделам исследования сделаны пока первые шаги, требуются дополнительные детальные и длительные совместные работы.

Авторы признательны экипажам научно-исследовательских судов «Яков Смирницкий», «Дмитрий Менделеев», «Профессор Логачев», «Академик Мстислав Келдыш», «Академик Сергей Вавилов», «Академик Федоров», «Polarstern» за помощь в экспедициях.

Авторы благодарны коллегам, принимавшим участие в совместных исследованиях аэрозолей в арктических морях: А.А. Буровкину, Л.В. Деминой, Г.И. Иванову, А.Б. Исаевой, В.А. Карлову, В.М. Купцову, В.Н. Лукашину, Н.В. Политовой, Т.Я. Пономаревой, В.Ю. Русакову, О.В. Севериной.

Авторы признательны И.В. Садовниковой за выполнение графических работ.

Авторы благодарят академика В.Е. Зуева за интерес к их работе и за поддержку в организации исследований и в публикации полученных данных.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 96-05-00043 и 98-05-64279), Немецкого научно-исследовательского общества (грант DFG STE-412/10-2) и Миннауки РФ (грант «Глобальные изменения природной среды и климата. Направление № 1»).

1. *Лавренчик В.Н.* Глобальные выпадения продуктов ядерных взрывов. М.: Атомиздат, 1965. 170 с.

2. Raatz W.E. // Pollution of the Arctic Atmosphere. Elsevier Science Publishers, 1991. P. 13–42.
3. Гордеев В.В. Речной сток в океан и черты его геохимии. М.: Наука, 1983. 160 с.
4. Gordeev V.V., Martin J.M., Sidorov I.S., Sidorova M.V. // American Journal of Science. 1996. V. 296. P. 664–691.
5. Rahn K.A. // Atmos. Environ. 1981. V. 15. P. 1507–1516.
6. Barrie L.A. // Atmos. Environ. 1986. V. 20. P. 643–663.
7. Barrie L.A. // Chemical Exchange Between the Atmosphere and Polar Snow. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 1996. P. 93–129.
8. Ельников А.В., Креков Г.М., Маричев В.Н. // Известия АН СССР. Сер. ФАО. 1988. Т. 24. № 8. С. 818–823.
9. Barrie L.A., Barrie M.J. // J. Atmos. Chem. 1990. V. 11. P. 211–246.
10. Расуна J.M. // Pollution of the Arctic Atmosphere. Berlin-Heidelberg: Elsevier, 1991. P. 97–122.
11. Виноградова А.А., Полиссар А.В. // Известия РАН. Сер. ФАО. 1995. Т. 31. № 2. С. 264–274.
12. Виноградова А.А. // Известия АН. Сер. ФАО. 1996. Т. 32. № 4. С. 479–486.
13. Зуев В.В., Буллаков В.Д., Ельников А.В., Смирнов С.В. // Оптика атмосферы и океана. 1996. Т. 9. № 12. С. 1599–1603.
14. Куценогий К.П., Ван Малдерен Х., Хоорнаерт С. и др. // Оптика атмосферы и океана. 1996. Т. 9. № 6. С. 712–719.
15. Куценогий К.П., Смирнова А.И., Переседов В.Ф. и др. // Оптика атмосферы и океана. 1997. Т. 10. № 6. С. 664–672.
16. Куценогий К.П., Ковальская Г.А., Смирнова А.И. и др. // Оптика атмосферы и океана. 1998. Т. 11. № 6. С. 625–631.
17. Kuusk V.V., Pronin A.A., Radionov V.F. et al. // Nucleation and Atmospheric Aerosols. Pergamon, Oxford-New York: Proceedings of the Fourteenth International Conference on Nucleation and Atmospheric Aerosols. 1996. P. 546–549.
18. Rovinsky F., Pastukhov B., Bouyolov Y., Burtseva L. // The Science of the Total Environment. 1995. V. 160/161. P. 193–199.
19. Козлов А.С., Пащенко С.Э., Еременко С.И. и др. // Оптика атмосферы и океана. 1997. № 6. С. 673–680.
20. Koutsenogii P. // Atmospheric Research. 1997. V. 44. P. 167–173.
21. Оболкин В.А., Потемкин В.Л., Ходжер Т.В. // Оптика атмосферы и океана. 1998. Т. 11. № 6. С. 632–635.
22. Shevchenko V.P., Lisitzin A.P., Kuptsov V.M. et al. // Berichte zur Polarforschung. 1995. № 176. P. 7–16.
23. Smirnov V.V., Shevchenko V.P., Stein R. et al. // Berichte zur Polarforschung. 1996. № 212. P. 139–143.
24. Серова В.В., Горбунова З.Н. // Океанология. 1997. Т. 37. № 1. С. 131–135.
25. Шевченко В.П., Виноградова А.А., Иванов Г.И. и др. // Доклады Академии наук. 1997. Т. 355. № 5. С. 673–676.
26. Шевченко В.П., Виноградова А.А., Иванов Г.И., Серова В.В. // Известия АН. Сер. ФАО. 1998. Т. 34. № 5. С. 664–668.
27. Шевченко В.П., Ван-Гриекен Р., Ван-Малдерен Г. и др. // Доклады Академии наук. 1999. Т. 366. № 2. С. 242–247.
28. Смирнов В.В., Шевченко В.П., Радионов В.Ф. // Метеорология и гидрология. 1999. № 9. С. 26–35.
29. Shevchenko V.P., Lisitzin A.P., Stein R. et al. // Land-Ocean Systems in the Siberian Arctic: Dynamics and History. Berlin: Springer-Verlag, 1999. P. 53–59.
30. Shevchenko V.P., Vinogradova A.A., Ivanov G.I. et al. // Berichte zur Polarforschung. 1999. № 242. P. 15–26.
31. Виноградова А.А., Малков И.П., Назаров Б.И., Полиссар А.В. // Известия АН СССР. Сер. ФАО. 1988. Т. 24. № 7. С. 680–686.
32. Ровинский Ф.Я., Петрухин В.А., Черханов Ю.П. и др. // Мониторинг фонового загрязнения природных сред. Вып. 5. Л.: Гидрометеоздат, 1989. С. 88–97.
33. Виноградова А.А. Арктический аэрозоль: загрязнения, микроструктура и оптические свойства. М., 1992 / Препринт № 2. Институт физики атмосферы РАН. 47 с.
34. Mullen R.E., Darby D.A., Clark D.L. // Bull. Geol. Soc. Amer. 1972. V. 83. P. 205–212.
35. Darby D.A., Naidu A.S., Mowatt T.C., Jones G. // The Arctic Seas – Climatology, Oceanography, Geology and Biology. New York, 1989. P. 657–720.
36. Macdonald R.W., Solomon S.M., Cranston R.E. et al. // Marine Geology. 1998. V. 144. P. 255–273.
37. Lisitzin A.P. Sedimentation in the World Ocean. Tulsa: Bante Press, 1972. 218 p.
38. Живаго В.Н., Богданов Ю.А. // Гидрофизические и гидрооптические исследования в Атлантическом и Тихом океанах. М.: Наука, 1974. С. 259–279.
39. Живаго В.Н. // Гидрофизические и оптические исследования в Индийском океане. М.: Наука, 1975. С. 200–213.
40. Лисицын А.П. Процессы океанской седиментации. Литология и геохимия. М.: Наука, 1978. 392 с.
41. Петрянов И.В., Козлов В.И., Басманов П.И., Огородников Б.И. Волокнистые фильтрующие материалы ФП. М.: Знание, 1968. 74 с.
42. Chester R., Johnson L.R. // Nature. 1971. V. 229. P. 105–107.
43. Leinen M., Prospero J.M., Arnold E., Blank M. // J. Geophys. Res. 1994. V. 99. P. 21017–21023.
44. Вальтер А.А., Феоктистова Н.В., Колесов Г.М., Сапожников Д.Ю. // Геохимия. 1993. № 2. С. 290–295.
45. Колесов Г.М. // Журнал аналитической химии. 1994. Т. 49. № 1. С. 160–171.
46. Van Malderen H., Rojas C., Van Grieken R. // Environ. Sci. Technol. 1992. V. 26. P. 750–756.
47. Серова В.В. Минералогия эоловой и водной взвеси Индийского океана. М.: Наука, 1988. 173 с.
48. Виноградова А.А., Егоров В.А. // Известия АН. Сер. ФАО. 1996. Т. 32. № 6. С. 796–802.
49. Виноградова А.А., Егоров В.А. // Известия АН. Сер. ФАО. 1997. Т. 33. № 6. С. 750–757.
50. Виноградова А.А., Пономарева Т.Я. // Известия АН. Сер. ФАО. 1999. Т. 35. № 5. С. 588–595.
51. Berner H., Wefer G. // Geological History of the Polar Oceans: Arctic Versus Antarctic. Kluwer Academic Publishers, 1990. P. 317–335.
52. Dibb J.E. // Chemical Exchange Between the Atmosphere and Polar Snow. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 1996. P. 249–274.
53. Kriewis M., Schrems O. // Proceeding of International Conference «Heavy Metals in the Environment». Hamburg, September 1995. V. 1. Edinburg: CEP Consultants, 1995. P. 371–374.
54. Prospero J.M. // J. Geophys. Res. 1977. V. 82. P. 6874–6986.
55. Лисицын А.П. Процессы терригенной седиментации в морях и океанах. М.: Наука, 1991. 271 с.
56. Chester R. Marine Geochemistry. London: Unwin Hyman, 1990. 698 p.
57. Лукашин В.Н., Иванов Г.В., Польшин В.В., Гурвич Е.Г. // Геохимия. 1996. № 10. С. 985–994.
58. Шевченко В.П., Лисицын А.П., Куценов В.М. и др. // Океанология. 1999. Т. 39. № 1. С. 142–151.
59. Sugden D. Arctic and Antarctic. A modern geographical synthesis. Oxford: Basil Blackwell, 1982. 472 p.
60. Kikuchi K., Taniguchi T., Uyeda H. // Tellus. 1996. V. 48B. P. 372–386.
61. Бримблум П. Состав и химия атмосферы / Пер. с англ. М.: Мир, 1988. 351 с.
62. Савенко В.С. // Доклады Академии наук. 1994. Т. 339. № 5. С. 670–674.
63. Shevchenko V.P. // Berichte zur Polarforschung. 1997. № 226. P. 153–154.
64. Кайро В.С., Дубровин М.А. // Тр. ИЭМ. 1987. Вып. 44 (134). С. 24–31.
65. Бартенева О.Д., Никитинская Н.И., Сакунов Г.Г., Веселова А.К. Прозрачность толщи атмосферы в видимой и ближней ИК-области спектра. Л.: Гидрометеоздат, 1991. 224 с.
66. Смирнов В.В. Ионизация в тропосфере. СПб: Гидрометеоздат, 1992. 312 с.
67. Смирнов В.В., Радионов В.Ф., Пронин А.А. и др. // Труды ИЭМ. 1996. Вып. 26 (161). С. 50–68.
68. Gillette D.A., Gomes L., Smirnov V.V. // Nucleation and Atmospheric Aerosols. Hampton: Deepack Publishers, 1992. P. 461–464.
69. Marks R. // Dt. Hydrogr. Z. 1987. V. 40. H. 2. P. 71–79.
70. O'Dowd C.D., Smith M.H. // J. Geophys. Res. 1993. V. 98. № D1. P. 1137–1149.
71. Didenko N.K., Ivanov Y.N., Puzov Yu.A., Smirnov V.V. // Atmospheric Research. 1994. V. 32. P. 195–201.

72. *Bergin M.H., Jaffrezo J.-L., Davidson C.I. et al.* // J. Geophys. Res. 1995. V. 100. N D8. P. 16275–16288.
73. *Nilsson E.D., Bigg E.K.* // Tellus. 1996. V. 48B. P. 234–253.
74. *Shevchenko V.P.* // Berichte zur Polarforschung. 1997. № 255. P. 136–137.
75. *Bigg E.K.* // Tellus. 1996. V. 48B. P. 223–233.
76. *Shevchenko V.P.* // Berichte zur Polarforschung. 1999. № 308. P. 74–75.
77. *Rahn K.A.* // Atmos. Environ. 1981. V. 15. P. 1447–1455.
78. *Maenhaut W., Cornille P., Pacyna J.M., Vitols V.* // Atmos. Environ. 1989. V. 23. № 11. P. 2551–2569.
79. *Мухайлов И.С.* // Советская Арктика. М.: Наука, 1970. С. 236–249.
80. *Добровольский В.В.* География почв с основами почвоведения. М.: ВЛАДОС, 1999. 384 с.
81. *Matthiessen J.* // Berichte zur Polarforschung. 1999. № 300. P. 222–235.
82. *Naidina O.D., Bauch H.A.* // Land-Ocean Systems in the Siberian Arctic: Dynamics and History. Berlin: Springer-Verlag, 1999. P. 577–585.
83. *Гецен М.В.* Водоросли в экосистемах Крайнего Севера. Л.: Наука, 1985. 165 с.
84. *Kienel U.* // Land-Ocean Systems in the Siberian Arctic: Dynamics and History. Berlin: Springer-Verlag, 1999. P. 377–406.
85. *Казарина Г.Х., Серова В.В.* // Современный и ископаемый микропланктон Мирового океана. М.: Наука, 1995. С. 100–107.
86. *Burckle L.H., Gayley R.I., Ram M., Petit J.-R.* // Geology. 1988. V. 16. P. 326–329.
87. *Marshall W.A.* // Nature. 1996. V. 383. P. 680.
88. *Rose N., Juggins S., Watt J., Battarbee R.* // Ambio. 1994. V. 23. P. 296–299.
89. *Novakov T., Cachier H., Clark J.S. et al.* // Sediment Records of Biomass Burning and Global Change. NATO ASI Series. V. I 51. Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 1997. P. 117–143.
90. *Renberg I., Wik M.* // Ambio. 1985. V. 14. P. 161–163.
91. *Wik M., Renberg I.* // Ambio. 1991. V. 20. № 7. P. 289–292.
92. *Rose N.L.* // The Science of the Total Environment. 1995. V. 160/161. P. 487–496.
93. *Karl J.F., Christensen E.R.* // Environmental Science & Technology. 1998. V. 32. N 2. P. 225–231.
94. *Sheridan P.J., Musselman I.H.* // Atmos. Environ. V. 19. P. 2159–2166.
95. *Савенко В.С.* Природные и антропогенные источники загрязнения атмосферы. Итоги науки и техники. Сер. Охрана природы и воспроизводство природных ресурсов. Т. 31. М.: ВИНТИ, 1991. 212 с.
96. *Sheridan P., Zoller W.H.* // J. Atm. Chem. 1989. V. 9. P. 363–381.
97. *Chester R., Elderfield H., Griffin J.J. et al.* // Marine Geology. 1972. V. 13. P. 91–105.
98. *Aston S.R., Chester R., Johnson L.R., Padgham R.C.* // Marine Geology. 1973. V. 14. № 1. P. 15–28.
99. *Шевченко В.П., Пустельников О.С., Лукашин В.Н., Серова В.В.* // Биогеохимия пограничных зон Атлантического океана. М.: Наука, 1994. С. 257–270.
100. *Лукашин В.Н., Шевченко В.П., Лисицын А.П. и др.* // Океанология. 1996. Т. 36. № 2. С. 288–298.
101. *Chester R.* // The role of Air-Sea Exchange in Geochemical Cycling. P. Buat-Menard (ed.). NATO ASI series. Series C, Mathematical and physical sciences. V. 185. D.Reidel Publishing Company, 1986. P. 443–476.
102. *Wedepohl K.H.* // Handbook of Geochemistry. Berlin: Springer-Verlag, 1969. P. 31–53.
103. *Лисицын А.П., Горбунова З.Н.* // Климатическая зональность и осадкообразование. М.: Наука, 1981. С. 160–171.
104. *Зверева Т.С., Игнатенко И.В.* Внутрипочвенное выветривание минералов в тундре и лесотундре. М.: Наука, 1983. 231 с.
105. *Gurevich V.I.* Recent sedimentogenesis and environment on the Arctic shelf of Western Eurasia. Norsk Polarinst. Medd. 1995. N 131. 92 p.
106. *Nünberg D., Levitan M.A., Pavlidis J.A., Shelekhova E.S.* // Geologische Rundschau. 1995. V. 84. P. 665–682.
107. *Дибнер В.Д.* // Геология СССР. Т. XXVI. Острова Советской Арктики. Геологическое описание. М.: Недра, 1970. С. 60–108.
108. *Люцарев С.В., Сметанкин А.В.* // Методы исследования органического вещества в океане. М.: Наука, 1980. С. 46–50.
109. *Романкевич Е.А.* Геохимия органического вещества в океане. М.: Наука, 1977. 256 с.
110. *Isidorov V.A.* Organic Chemistry of the Earth's Atmosphere. Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 1990. 210 p.
111. *Matthias-Maser S., Jaenicke R.* // J. of Atmospheric Research. 1995. V. 39. P. 279–286.
112. *Rosen H., Novakov T., Bodhain B.A.* // Atmos. Environ. 1981. V. 15. P. 1371–1374.
113. *Cachier H., Buat-Menard P., Chesseelet R.* // Tellus. 1986. V. 38B. P. 161–177.
114. *Pueschel R.F., Boering K.A., Verma S. et al.* // J. Geophys. Res. 1997. V. 102. N D11. P. 13113–13118.
115. *Hansen A.D.A., Rosen H.* // Atmos. Environ. 1985. V. 19. № 12. P. 2175–2180.
116. *Hansen A.D.A., Polissar A.V., Schnell R.C.* // Atmosph. Res. 1997. V. 44. P. 153–165.
117. *Polissar A.V., Hopke P.K., Malm W.C., Sisler J.F.* // J. Geophys. Res. 1998. V. 103. N D15. P. 19035–19044.
118. *Taylor S.R.* // Geochim. Cosmochim. Acta. 1964. V. 28. P. 1273–1285.
119. *Chiappello I., Bergametti G., Chatenet B. et al.* // J. Geophys. Res. 1997. V. 102. N D12. P. 13701–13709.
120. *Ронов А.Б., Ярошевский А.А.* // Геохимия. 1967. № 11. С. 1285–1309.
121. *Перельман А.И.* Геохимия ландшафта. М.: Высшая школа, 1975. 342 с.
122. *Vilchek G.E., Krasovskaya T.M., Tsyban A.V., Chelyukanov V.V.* // Polar Geography. 1996. V. 20. P. 20–43.
123. *Arctic Pollution Issues: A State of the Arctic Environment Report.* Oslo: AMAP (Arctic Monitoring and Assessment Programme), 1997. 188 p.
124. *Гурский Ю.Н.* Морской перигляциал и оледенение Баренцево-Карского шельфа в плейстоцене // Тезисы докл. междунар. конф. Мурманск, 19–21 ноября 1998, г. Апатиты. 1998. С. 29–32.
125. *Shaw G.E.* // Nature. 1982. V. 299. P. 815–818.
126. *Ross H.B.* // Tellus. 1985. V. 37B. P. 78–90.
127. *Mosher B.W., Duce R.A.* // J. Geophys. Res. 1987. V. 92. N D11. P. 13289–13298.
128. *Mosher B.W., Duce R.A., Prospero J.M., Savoie D.L.* // J. Geophys. Res. 1987. V. 92. N D11. P. 13277–13287.
129. *Ellis W.G., Jr., Arimoto R., Savoie D.L. et al.* // J. Geophys. Res. 1993. V. 98. N D7. P. 12673–12685.
130. *Перельман А.И.* Геохимия. М.: Высшая школа, 1989. 528 с.
131. *Методические основы исследования химического состава горных пород, руд и минералов.* М.: Недра, 1979. 400 с.
132. *Дэвис Д.С.* Статистический анализ данных в геологии. Кн. 2 / Пер. с англ. М.: Недра, 1990. 427 с.
133. *Горная энциклопедия.* М.: Советская энциклопедия. Т. 3. 1987. 592 с.
134. *Shevchenko V.P., Vinogradova A.A., Stein R. et al.* // Terra Nostra. Schriften der Alfred-Wegener-Stiftung. 1996. N 9. P. 27.
135. *Maenhaut W., Ducastel G., Leck C. et al.* // Tellus. 1996. V. 48B. P. 300–321.
136. *Pfirman S., Gascard J.C., Wollenburg I. et al.* // Polar Res. 1989. V. 7. P. 59–66.
137. *Nürnberg D., Wollenburg I., Dethleff D. et al.* // Marine Geology. 1994. V. 119. P. 185–214.
138. *Eicken H., Reimnitz E., Alexandrov V. et al.* // Continental Shelf Research. 1997. V. 17. P. 205–233.
139. *Kolatschek J., Freitag J., Eicken H.* // Terra Nostra. Schriften der Alfred-Wegener-Stiftung. 1996. N 9. P. 37.
140. *Maenhaut W., Zoller W.H., Duce R.A., Hoffman G.L.* // J. Geophys. Res. 1979. V. 84. P. 2421–2431.
141. *Landsberger S., Vermette S.J., Barrie L.A.* // J. Geophys. Res. 1990. V. 95. P. 3509–3513.
142. *Li S.-M., Winchester J.M.* // J. Geophys. Res. 1990. V. 95. P. 1797–1810.

143. Mosher B.W., Winkler P., Jaffrezo J.L. // Atmos. Environ. 1993. V. 27A. P. 2761–2772.
144. Dannecker W., Hinzpeter H., Kirzel H.-J. et al. // Circulation and Contaminant Fluxes in the North Sea. Springer-Verlag, 1994. P. 138–189.
145. Hacisalihoglu G., Eliyakut F., Olmez I. et al. // Atmos. Environ. 1992. V. 26A. P. 3207–3218.
146. Rachor E. (ed.). Scientific Cruise Report of the Arctic Expedition ARK-XI/1 of RV «Polarstern». Berichte zur Polarforschung. 1997. N 226. 157 p.
147. Виноградова А.А., Малков И.П., Полуссар А.В., Храмов Н.Н. // Известия РАН. ФАО. 1993. Т. 29. № 2. С. 164–172.
148. Heintzenberg J., Hansson H.C., Lannefors H. // Tellus. 1981. V. 33B. P. 162–171.
149. Sirois A., Barrie L.A. // J. Geophys. Res. 1999. V. 104. N D9. P. 11599–11618.
150. Guieu C., Martin J.-M., Tomas A.J., Elbaz-Poulichet F. // Marine Pollution Bulletin. 1991. V. 22. P. 176–183.
151. Guerzoni S., Molinaroli E., Rossini P. et al. // Chemosphere. 1999. V. 39. P. 229–246.
152. Cunningham W.C., Zoller W.H. // J. Aerosol Sci. 1981. V. 12. N 4. P. 367–384.
153. Rahn K.A., Lowenthal D.H. // Science. 1985. V. 228. P. 275–284.
154. Lowenthal D.H., Rahn K.A. // Atmos. Environ. 1985. V. 19. P. 2011–2024.
155. Barrie L.A., Staebler R., Toom D. et al. // J. Geophys. Res. 1994. V. 99. N D12. P. 25439–25451.
156. Duce R.A., Hoffman G.L., Ray B.J. et al. // Marine Pollutant Transfer. Toronto: Lexington Books, 1976. P. 77–119.
157. Duce R.A., Arimoto R., Ray B.J. et al. // J. Geophys. Res. 1983. V. 88. P. 5321–5342.
158. Dulac F., Buat-Menard P., Ezat U. et al. // Tellus. 1989. V. 41B. P. 362–378.
159. Виноградова А.А., Шевченко В.П., Лисицын А.П. // Физика атмосферного аэрозоля. Международная конференция: Сб. трудов. М.: Диалог-МГУ, 1999. С. 102–110.
160. Pacyna J.M., Semb A., Hanssen J.E. // Tellus. 1984. V. 36B. P. 163–178.
161. Pacyna J.M., Ottar B., Tomza U., Maenhaut W. // Atm. Environ. 1985. V. 19. P. 857–864.
162. Виноградова А.А., Пономарева Т.Я. // Известия АН. Сер. ФАО. 2000. Т. 36. № 3.
163. Akeredolu F.A., Barrie L.A., Olson M.P. et al. // Atmos. Environ. 1994. V. 28. P. 1557–1572.
164. Израэль Ю.А. Радиоактивные выпадения после ядерных взрывов и аварий. СПб: Прогресс-погода, 1996. 354 с.
165. Rahn K., Mc Caffrey R.J. // Aerosol: anthropogenic and natural sources and transport. Annals N.Y. Academy Sci. 1980. N 4. P. 468–503.
166. Duce R.A., Liss P.S., Merrill J.T. et al. // Global Biogeochem. Cycles. 1991. V. 5. P. 193–259.
167. Бурова Л.П. Влагооборот в атмосфере Арктики. Л.: Гидрометеоиздат, 1983. 128 с.
168. Darby D.A., Burckle L.H., Clark D.L. // Earth Planet. Sci. Lett. 1974. V. 24. P. 166–172.
169. Pfirman S., Wollenburg I., Thiede J., Lange M. // Paleoclimatology and Paleometeorology: Modern and Past Patterns of Global Atmospheric Transport. Kluwer Academic Publishers, 1989. P. 463–493.
170. Dethleff D., Loewe P., Weiel D. et al. Winter expedition to the Southwestern Kara Sea – investigations on formation and transport of turbid sea-ice // Berichte zur Polarforschung. 1998. № 271. 40 p.
171. Шевченко В.П., Лисицын А.П., Полякова Е.И. и др. // Тезисы докладов XIII Международной школы морской геологии. М.: ГЕОС. 1999. Т. 1. С. 237–238.
172. Воскресенский А.И., Петров Л.С. // Северный Ледовитый и Южный океаны. Л.: Наука, 1985. С. 45–64.
173. Лисицын А.П. // Океанология. 1994. Т. 34. С. 735–747.
174. Lisitzin A.P. // Biogeochemical Cycling and Sediment Ecology. Kluwer Academic Publishers, 1999. P. 69–109.
175. Лисицын А.П. Ледовая седиментация в Мировом океане. М.: Наука, 1994. 445 с.

V.P. Shevchenko, A.P. Lisitzyn, A.A. Vinogradova, V.V. Smirnov, V.V. Serova, R. Stein. Aerosols of the Arctic – the results of ten-year investigations.

The results of investigation of the above-water aerosols over the seas of the Russian Arctic and Central Arctic near North Pole for the period of 1991–1998 by 10 research expeditions are presented. The mineral and chemical composition of aerosols, their size distribution, ways of Aeolian material transport, and degree of anthropogenic pollution of the arctic atmosphere were under study. The particular attention was paid to estimates of horizontal and vertical fluxes of various components. The investigations were conducted simultaneously by several methods: collecting the particles with nylon meshes of large (10 m²) area, filtering the air through the Whatman-41 and AFA-KHA filters, and measuring particle size distribution photoelectric counter