

# Система моря Лаптевых и прилегающих морей Арктики: современное состояние и история развития

---

## 1.4. Атмосферные аэрозоли как источник осадочного вещества и загрязнений в Северном Ледовитом океане

В.П. Шевченко<sup>1</sup>, А.А. Виноградова<sup>2</sup>, А.П. Лисицын<sup>1</sup>, А.Н. Новигатский<sup>1</sup>, Н.В. Горюнова<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН (МО РАН), Москва, Россия.

<sup>2</sup> Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН (ИФА РАН), Москва, Россия

Обобщены результаты исследований состава атмосферных аэрозолей и нерастворимых частиц в снеге в различных районах Арктики, выполненных авторами в 1994-2007 гг., и литературные данные. Исследовался гранулометрический, минеральный и элементный состав частиц, выявлены антропогенные и природные составляющие, их дальние и сверхдальние источники. Показано, что фоновое содержание нерастворимых частиц размером более 0,45 мкм в снеге Арктики находится в пределах 0,2-3 мг/л, что значительно выше, чем концентрация взвеси в морской воде. Осадочный материал в свежеснеге представлен в основном минеральными и биогенными частицами (споры, пыльца, волокна, диатомовые водоросли) пелитовой и алевроитовой размерности, а также в небольшом количестве обнаружены антропогенные сажа и гладкие сферы сгорания. Исследования литологии и геохимии снежного покрова - естественного коллектора как растворенного, так и взвешенного эолового материала - позволяют выявить новые аспекты взаимодействия аэрозолей с различными природными объектами в Арктике. Через снег и лед (как депонирующие среды) арктические аэрозоли оказывают вторичное воздействие на окружающую среду, что повышает значение эолового переноса вещества для арктических экосистем. Балансные оценки, полученные на основе экспериментальных данных и модельных расчетов, показывают, что вклад аэрозолей в формирование осадочного материала в Арктике близок к вкладу речного стока за пределами «маргинальных фильтров» рек. В целом для Северного Ледовитого океана (пелагиаль) вклад аэрозолей в осадкообразование составляет примерно 10%.

### Введение

Атмосфера - один из каналов обмена и перераспределения вещества на Земле. Тот факт, что атмосфера содержит взвешенные в воздухе частицы аэрозоля, оказывает существенное влияние на качество воздуха, дальность видимости, оптические свойства атмосферы и климат [Brimblecombe, 1996; Кондратьев, 2004]. В северной полярной области возможен перенос атмосферных аэрозолей на расстояния до 10 тыс. км и более за 5-10 суток [Виноградова, 1993], при котором происходит перемешивание и перераспределение аэрозолей различного происхождения (в том числе устойчивых антропогенных экотоксикантов). Однако до последних лет большинство исследователей считало роль аэрозолей в поставке вещества в Арктику ничтожной [Darby et al., 1989]. Арктические аэрозоли рассматривались в основном как воздушный источник загрязнений экосистемы [Barrie, Barrie, 1990; Ровинский и др., 1995; Виноградова, Пономарева, 2001; Виноградова и др., 2002], а не как естественная составляющая часть атмосферы, вносящая свой вклад во все процессы межгеосферного обмена.

В Арктике по сравнению с другими климатическими поясами существуют особые условия, определяющие количество, свойства и состав аэрозольного материала. Большая часть региона занята Северным Ледовитым океаном (СЛО), почти постоянно покрытым льдом, и удалена от источников аэрозолей. Поэтому данных о закономерностях распределения аэрозольного вещества над территорией высоких широт практически нет. Почти все наблюдения проведены на полярных станциях, расположенных на суше или на крупных островах [Rahn, 1981; Виноградова, 1993, 1996; Виноградова, Полиссар, 1995; Barrie, Barrie, 1990; Расуна et al., 1984, 1985; Polissar et al., 1998; Sirois, Barrie, 1999; Quinn et al., 2002; Yli-Tuomi et al., 2003]. Начиная с 1991 г. аэрозоли в Центральной

Арктике активно изучались также в экспедициях на борту шведского ледокола «Oden» [Leek et al., 2001].

Важную информацию для оценки поставки аэрозольного вещества в Северный Ледовитый океан и его моря дает изучение состава снежного покрова в Арктике. Первые исследования твердых частиц в снеге с поверхности дрейфующих льдов Арктики были выполнены в канадском секторе [Mullen et al., 1972; Darby et al., 1974]. Состав осадочного материала в снежном покрове льдов в области Трансполярного дрейфа изучался в экспедициях немецкого научно-исследовательского ледокола «Polarstern» [Pfirman et al., 1989]. Содержание тяжелых металлов в снеге на дрейфующих льдинах и в приморских районах Арктики было определено в ряде работ [Mart, 1983; Бардин и др., 1990; Матишов, Голубева, 1998; Walker et al., 2003], а углеводородов - в работе [Немировская, 2002].

В 2007 г. в рамках проекта Международного Полярного Года «Эоловый и ледовый перенос и потоки вещества (включая экотоксиканты) в Арктике (КРИОЭОЛ)» были выполнены модельные оценки среднего вклада промышленности Мурманской области и региона Норильска в загрязнение тяжелыми металлами (ТМ) окружающей среды морей Белого, Баренцева, Карского и Лаптевых. Особое внимание уделено оценке изменения этого вклада за последние 20 лет XX в., а также сравнению мощностей атмосферного и речного каналов поступления тяжелых металлов в воды рассматриваемых морей.

В данной работе обобщаются основные результаты исследований состава аэрозоля и снега в Арктике, полученные авторами в последние годы, подробно обсуждается влияние аэрозольного материала на окружающую среду и донные осадки в арктических водоемах. Делаются некоторые прогнозы изменения в процессах загрязнения окружающей среды Арктики на ближайшие годы.

### **Материалы и методы экспериментальных исследований**

Оценка роли аэрозольного материала в современном осадконакоплении и формировании природной среды Арктики основана на результатах исследований аэрозолей приподнятого слоя атмосферы и снежного покрова, проведенных авторами в акваториях морей Российской Арктики, а также в Центральной Арктике в 1991-2006 гг. [Shevchenko et al., 1995; Smirnov et al., 1996; Шевченко и др., 1998а, 2004, 2007а, б; Виноградова и др., 2002; Смирнов и др., 1996; Иванов, 2002; Куценогий и др., 2005; Смирнов, Шевченко, 2003; Shevchenko, 2003; Польшкин и др., 2004], и обобщении литературных данных. Объем выполненных в различных экспедициях аэрозольных исследований и точки измерения гранулометрического состава аэрозолей представлены в работе [Шевченко и др., 2006], участки маршрутов судов, на которых проводился отбор проб аэрозолей, показан на рис. 1.4.1, точки отбора проб снега - на рис. 1.4.2.

Изучение распределения аэрозольных частиц по размерам проводилось с помощью фотоэлектрического счетчика PC-218 (Roeco, USA). Определялись концентрации частиц в диапазонах 0,5-1; 1-2; 2-3; 3-5; 5-10 мкм с погрешностью измерений  $\pm 5\%$ .

Во время экспедиций на научно-исследовательских судах фильтрация воздуха проводилась через ацетат-целлюлозные фильтры АФА-ХА-20 с рабочей поверхностью 20 см<sup>2</sup> и стекловолнистые фильтры Whatman-41, улавливающие как субмикронные частицы, так и более крупные аэрозоли, в том числе частицы морской соли. Параллельно с фильтрацией использовался метод сбора больших количеств аэрозолей нейлоновыми сетями, которые устанавливались в носовой части судна на высоте 4-9 м над палубой, их общая площадь около 10 м<sup>2</sup> [Шевченко, 2006]. При такой методике встречный поток воздуха вызывает возникновение электростатического заряда, которым притягиваются частицы аэрозоля. После экспозиции (обычно 1 сутки) сети промывались дистиллированной водой (при этом заряд снимается), и частицы аэрозоля отфильтровывались через ядерный фильтр с размером пор 0,45 мкм. Получаемые аэрозольные пробы не засорены морской солью, однако в них также потеряны растворимые в воде вещества аэрозолей, что следует иметь в виду при сопоставлении с

данными других исследователей. Для предупреждения загрязнения проб со стороны судна отбор аэрозолей обоими методами проводился только во время движения судна при встречном ветре.

Пробы снега в Центральной Арктике для предотвращения загрязнения отбирались на расстоянии более 200 м от судна в направлении против ветра в полиэтиленовые пакеты, вымытые перед экспедицией в чистой комнате класса 100 в Институте полярных и морских исследований им. Альфреда Вегенера (Бремерхафен, Германия) [Шевченко и др., 2004]. При отборе использовались одноразовые стерильные полиэтиленовые перчатки. После отбора снег растапливали при комнатной температуре и полученная вода профильтровывалась через предварительно взвешенные мембранные фильтры с порами диаметром 0,45 мкм и стекловолоконистые фильтры GF/F.

Важным аспектом наших экспериментальных исследований является то, что методики пробоотбора позволяли анализировать пробы аэрозолей и снега одинаковыми методами и часто на одном и том же оборудовании.

Материал воздушных проб и снега, содержащийся на фильтрах, был исследован авторами методами оптической и сканирующей электронной микроскопии в Институте им. П.П. Ширшова РАН (Москва, Россия) на микроскопе JSM-U3 (Jeol, Japan), в Антверпенском университете (Бельгия) на микроскопе JXA-733 с рентгеновской микрозондовой приставкой (Jeol, Japan), в Институте полярных и морских исследований им. А. Вегенера на микроскопах XL 30 ESEM (Philips, USA) и SEM-515с рентгеновским микроанализатором EDAX P V9900 (Philips, USA).

Элементный состав проб изучался в основном методом инструментального нейтронно-активационного анализа в Институте геохимии и аналитической химии РАН по методике, подробно описанной в работе [Колесов, 1994]. Элементный состав проб, собранных на о. Мудьюгском в Белом море в 2003 г., был изучен методом рентгенофлуоресцентного анализа с использованием синхротронного излучения (РФА СИ) в Сибирском отделении РАН по методике, описанной в работе [Куценогий и др., 1997]. В этих пробах с помощью реакционной газожидкостной хроматографии [Makarov et al., 1999] также определялись концентрации органического и неорганического углерода.

### **Аэрозоли Арктики**

**Количественное распределение.** Содержание нерастворимой (бессолевой) части эоловой взвеси зависит от климатической зоны (максимум в аридных зонах), близости крупных массивов суши, направления и скорости ветра, влажности и атмосферных осадков [Лисицын, 1978, 1991; Chester, 1990; Шевченко и др., 2004].

Содержание эоловой взвеси в Арктике характеризуется сильной пространственной и временной изменчивостью. 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. Это подтвердил и траекторный анализ распространения воздушных масс в район отбора пробы. Очень сильные кatabатические ветры, формирующиеся при стекании воздушных масс с ледового купола Гренландии, поставляют в прибрежную атмосферу большое количество сравнительно крупных (более 2 мкм) частиц почвенного происхождения [Kikuchi et al., 1996]. Самое низкое содержание эоловой взвеси ( $0,02\text{-}0,06 \text{ мкг/м}^3$ ) зарегистрировано нами на расстоянии более 50 км от суши после дождя, т.е. после вымывании аэрозолей атмосферными осадками [Brimblecombe, 1996].

Среднее значение содержания нерастворимых 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 воздушной взвеси в аридных зонах [Лисицын, 1978, 1991; Chester, 1990].

В морях Российской Арктики наши данные не позволяют ярко продемонстрировать циркумконтинентальную зональность, так как маршруты судов в основном проходили вблизи суши (континента Евразии или крупных островов) (см. рис. 1.4.1). 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. Количественное распределение аэрозолей - величина быстро меняющаяся, зависящая от сочетания многих региональных и локальных факторов. В частности, летом общее содержание аэрозолей над морской поверхностью возрастает за счет морских солей, составляющих до 70-80% взвеси на фильтрах [Chester, 1990]. Содержание соли возрастает с ростом скорости ветра и сухости воздуха.

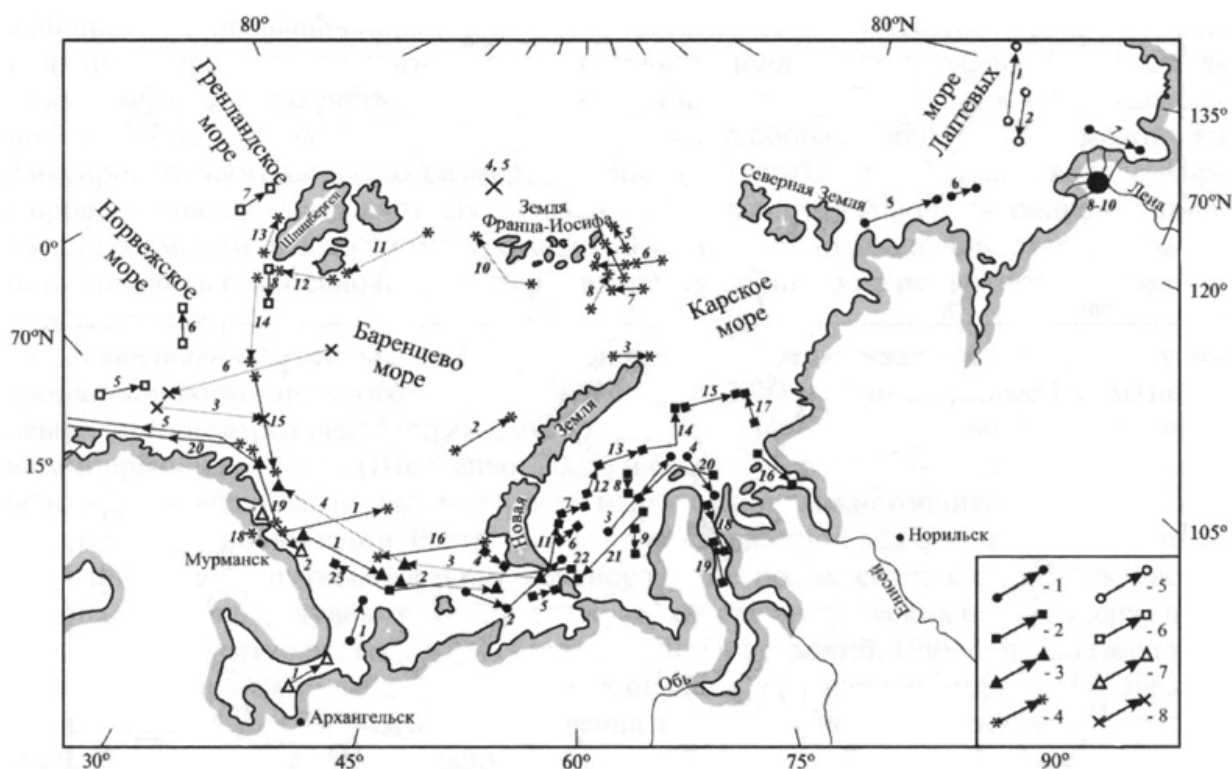


Рис. 1.4.1. Места отбора сетевых проб аэрозолей: 1 – экспедиция SPASIBA (август–сентябрь 1991 г.); 2 – 49-й рейс НИС «Дмитрий Менделеев» (август–октябрь 1993 г.); 3 – 31-й рейс НИС «Академик Мстислав Келдыш» (сентябрь 1993 г.); 4 – 9-й рейс НИС «Профессор Логачев» (август–октябрь 1994 г.); 5 – ARK-XI/1 рейс НИС «Polarstern» (июль–сентябрь 1995 г.); 6 – 15-й рейс НИС «Профессор Логачев» (июль–август 1996 г.); 7 – 11-й рейс НИС «Академик Сергей Вавилов» (август–октябрь 1997 г.); 8 – 14-й рейс НЭС «Академик Федоров» (сентябрь 1998 г.). Цифры у стрелок обозначают номера проб в соответствующих рейсах

**Гранулометрический состав.** Счетное содержание частиц крупнее 0,5 мкм над морем Лаптевых (июль–сентябрь 1995 г.), по данным измерений в 63 точках, находилось в пределах от 0,09 до 24,1 см<sup>3</sup> (в среднем 7,84 см<sup>3</sup>; стандартное отклонение 6,47 см<sup>3</sup>) [Smirnov et al., 1996; Shevchenko, 2003], что близко к величинам счетных концентраций частиц такого же размера в Норвежском море, на о. Врангеля, на архипелаге Земля Франца-Иосифа и в средней полосе России - в Обнинске [Нагурный и др., 1990; Смирнов и др., 1996; Smirnov et al., 1996]. В общем случае содержание более мелких частиц (от 0,5 до 1,0 мкм) намного выше, чем крупных.

В открытом море и в Центральной Арктике, где открытая ото льда вода занимала более 30% поверхности, содержание частиц крупнее 0,5 мкм заметно возрастало при увеличении скорости ветра [Смирнов и др., 1996; Смирнов, Шевченко, 2003]. Рост содержания частиц в приводном слое атмосферы при повышении скорости ветра ранее

был отмечен и в других районах Мирового океана [O'Dowd, Smith, 1993]. Это отражает поступление в атмосферу частиц морской соли с мелкими капельками морской воды, образующимися при разрушении воздушных пузырьков на поверхности океана, что подтверждено изучением элементного состава проб аэрозолей.

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 за счет образования крупных капелек тумана и конденсации более мелких частиц [Смирнов, Шевченко, 2003]. Такое явление существенно для вымывания вещества из атмосферы (взвешенные, коллоидные и растворенные формы).

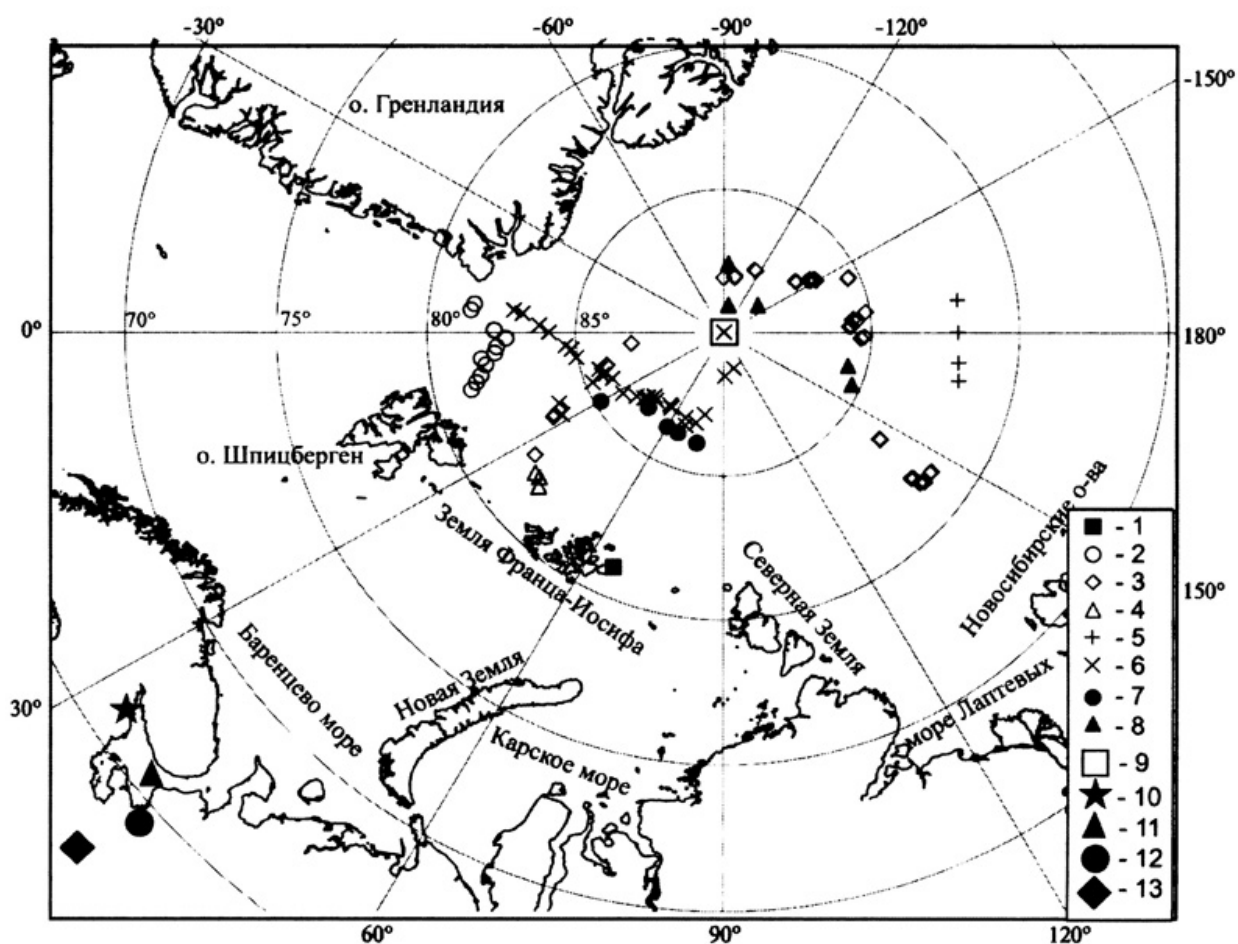


Рис. 1.4.2. Места отбора проб снега: 1 – 9-й рейс НИС «Профессор Логачев» (август 1994 г.); 2 – ARK-XIII/2 рейс НИС «Polarstern» (июль–август 1997 г.); 3 – ARK-XIV/1a рейс НИС «Polarstern» (июль 1998 г.); 4 – 14-й рейс НИС «Академик Федоров» (сентябрь–октябрь 1998 г.); 5 – 17-й рейс НЭС «Академик Федоров» (сентябрь 2002 г.); 6 – ARK-XVII/2 рейс НИС «Polarstern» (август–сентябрь 2001 г.); 7 – дрейфующая станция СП-32; 8 – дрейфующая станция СП-33; 9 – дрейфующая станция (апрель 2001 и 2002 гг.) и экспедиция ПАЛЭКС (апрель 2007 г.); 10 – весенние экспедиции в район биостанции «Картеш» (март 2001 г., апрель 2002 г. и март–апрель 2004 г.); 11 – экспедиция на Г/С «Сергей Кравков» (апрель 2003 г.); 12 – экспедиции в устье р. Северной Двины (март 2003, 2004 и 2005 гг., февраль 2006 г., март 2007 г.); 13 – зимние экспедиции в Кенозерский национальный парк (январь 2001–2004 гг.)

Наиболее низкие концентрации аэрозольных частиц крупнее 0,5 мкм, особенно частиц крупнее 1 мкм, были отмечены нами ранней весной (в конце марта - начале апреля 2004 г.) на Белом море в районе мыса Картеш на севере Карелии. В это время губа Чула покрыта льдом и район пробоотбора изолирован от влияния водной поверхности на состав аэрозоля. 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. Средний размер частиц по счетному содержанию от пробы к пробе изменялся незначительно (от 1,24 до 1,69 мкм). Поскольку сетевой метод сбора проб не дает возможности фиксировать частицы малых

размеров (меньше 0,5 мкм), максимальный вклад в формирование массы аэрозоля таких проб вносит небольшое количество более крупных частиц размером от 5 до 25 мкм, реже до 50 мкм. Именно они и являются основным источником массы осадочного материала, поступающего на поверхность льдов и в донные осадки.

**Вещественный состав, по данным электронной микроскопии.** По данным электронно-микроскопического анализа [Shevchenko, 2003], крупные (более 1 мкм) несолевые частицы аэрозолей Арктики, отобранные сетевым методом, состоят в основном из минеральных частиц [Шевченко, 2006] и органического вещества (растительные волокна, пыльца, диатомовые водоросли и др.). Основным источником минеральных частиц служат почвы суши. Растительные волокна длиной до нескольких сотен микрон и пыльца сухопутных растений переносятся ветром на сотни километров. Растительные волокна выдуваются ветрами с поверхности арктических почв, содержащих большое количество растительных остатков [Добровольский, 1999]. Пыльца и споры, обнаруженные в водной взвеси, в донных осадках арктических морей [Matthiessen, 1999; Naidina, Bauch, 1999] и в кернах бурения ледников арктических островов [Andreev et al., 1997], поступают на морскую поверхность и на острова также в основном за счет эолового переноса. В последние годы в Центральной Арктике среди частиц мельче 0,5 мкм были отмечены бактерии и фрагменты микроводорослей, которые могли попасть в приводный слой атмосферы в результате разрушения пузырьков в поверхностном микрослое воды в полыньях и трещинах [Bigg, Leek, 2001; Leek et al., 2001]. Зимой, когда поверхность Арктики покрыта снегом и льдом, основной вклад в состав аэрозолей вносит дальний перенос [Rahn, 1981; Maenhaut et al., 1989], поставляющий в том числе и антропогенные компоненты.

В некоторых пробах отмечены морские диатомеи, поступающие в приводный слой атмосферы при выдувании ветром с поверхности морской воды, а также пресноводные диатомеи, поступающие при дальнем переносе пыли с поверхности пересыхающих в конце лета озер в тундре [Гецен, 1985; Полякова, 1997; Kienel, 1999]. Явление дальнего переноса диатомеи фиксировалось и в аэрозольных пробах других районов Мирового океана [Казарина, Серова, 1995], на ледовом куполе Антарктиды вблизи Южного полюса, а также на куполе Гренландии [Burckle et al., 1988].

Для состава арктических аэрозолей характерны пористые частицы пеплов (fly ash) размером 5-50 мкм и гладкие сферы диаметром 0,5-10 мкм. Пористые углеродные частицы в основном поступают в атмосферу с выбросами металлургических, горнодобывающих комбинатов, тепловых электростанций, ТЭЦ, а также из районов лесных пожаров [Novakov et al., 1997]. По данным всех экспедиций, содержание пористых пепловых частиц в аэрозолях увеличивалось по мере приближения к Кольскому п-ову и Норильску, т.е. к ближайшим районам с развитой промышленностью. Эти частицы накапливаются в арктических почвах, ледниках, донных осадках тундровых водоемов и являются маркерами аэрозольного переноса загрязняющих веществ [Rose, 1995; Rose et al., 2004].

Гладкие сферы образуются при высокотемпературных процессах и выбрасываются в атмосферу дымовыми факелами; их часто называют "сферами сгорания" (combustion spheres). Они могут переноситься воздушными массами на большие расстояния и ранее были обнаружены в аэрозолях Арктики рядом авторов [Sheridan, Musselman, 1985]. Самое высокое содержание сфер сгорания (более 50% частиц крупнее 1 мкм) обнаружено нами в аэрозоле Енисейского залива в сентябре 1993 г. при поступлении воздушных масс из района Норильска [Шевченко, 2006].

Таким образом, электронно-микроскопические исследования морфологии крупных (более 1 мкм) нерастворимых аэрозольных частиц и определение биогенных остатков позволили обнаружить в эоловом материале над арктическими морями России в июле-сентябре компоненты различной природы - почвенные, биологические, антропогенные и др., в основном принесенные с территории Евразии.

**Минеральный состав.** Минеральный состав аэрозолей является одним из важных индикаторов источников эолового материала [Лисицын, 1978; Chester, 1990], он влияет также на оптику аэрозолей, во многом определяет их химический состав.

Процентное содержание минералов, собранных нейлоновыми сетями, было рассчитано на кристаллическую фазу. При этом изучался материал, состоящий в основном из частиц размером 1-10 мкм [Серова, Горбунова, 1997]. Минеральный состав полученных нами проб отличается сильной пространственной и временной изменчивостью. Главным минералом нерастворимой фазы аэрозолей Арктики является кварц. В среднем (анализ 47 проб, отобранных в августе-октябре в трех экспедициях) аэрозоли Арктики содержат 37,8% кварца (стандартное отклонение 16,1%). 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 9,7% (при стандартном отклонении 5,2%). 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 (Лисицын, 1978). В глинистых сланцах - главных осадочных породах континентов - величина Q/F отношения близка к 2 [Wedepohl, 1969]. Повышение этого отношения свидетельствует о более интенсивном разрушении (выветривании) полевых шпатов, особенно значительном в тропиках. В Российской Арктике 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. Иллит - главный глинистый минерал аэрозолей Арктики, а также мегапровинции континентальной коры и взвеси большинства рек (кроме рек экваториальной зоны) [Лисицын, Горбунова, 1981]. Если принять сумму глинистых минералов за 100%, то в сетевых пробах аэрозолей Российской Арктики иллит составлял в среднем по 47 пробам 45,8%, сумма хлорита и каолинита, которые не удается разделить при анализе, - 50,9%, монтмориллонит - 3,3%.

**Элементный состав.** Химический состав аэрозолей определяется его источниками и типом химических превращений, которым подвергается аэрозольное вещество в атмосфере [Brimblecombe, 1996]. Поэтому химический состав, так же как и минеральный, - один из важнейших маркеров происхождения аэрозолей. На основе современных методов анализа нам удалось изучить как химический состав индивидуальных аэрозольных частиц, так и целиком состав вещества проб, собранных как сетевым методом (нерастворимые в воде частицы), так и фильтрацией воздуха (все аэрозольные частицы крупнее 0,5 мкм, включая морские соли).

**Индивидуальные аэрозольные частицы.** Органогенные частицы и сажевый углерод не дают главных индуцированных сигналов в рентгеновском диапазоне, поэтому нами получены данные только о составе частиц, дающих ответное рентгеновское излучение после бомбардировки пучком электронов [Шевченко, 2006]. После статистической обработки были выделены четыре основных типа нерастворимых 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.

Зерна минералов-алюмосиликатов диаметром 1-5 мкм имеют неправильную форму и различную степень окатанности. Это принесенные ветром минеральные частицы почвы (в основном полевые шпаты и глинистые минералы). Аэрозольные зерна кварца обычно имеют размеры от 1 до 3 мкм и форму, близкую к сферической. Обогащенные Si-Fe- и Fe-Si-частицы скорее всего являются также зернами кварца, покрытыми пленкой гидроксидов железа, - так называемого речного кварца.

Сферы сгорания, обогащенные Fe, P, O и микроэлементами, имели размер от 0,3 до 3 мкм. В режиме ручного управления микрозондом было обнаружено обогащение сфер сгорания такими типично антропогенными микроэлементами, как Ni, Cu, Cr, Zn, Ca, Mn и Sb. Наиболее высокое содержание обогащенных микроэлементами сфер сгорания отмечено в пробах, отобранных из воздушных масс, поступивших из района Норильска.

*Элементный состав нерастворимых аэрозолей.* Рассмотрим элементный состав аэрозолей, собранных сетевым методом (без учета растворимой части). Основным компонентом (по массе) этого аэрозоля является углерод - от 7,54 до 48,9%, среднее значение для 18 проб составляет 30,2% при стандартном отклонении 12,5% [Шевченко, 2006]. В пересчете на органическое вещество (ОВ) это 14-97% массы аэрозольного вещества. Таким образом, аэрозоли Арктики являются важным источником органического вещества над акваторией СЛО.

Отношение концентрации сажевого углерода к концентрации общего углерода в сетевых пробах аэрозолей, собранных в экспедиции SPASIBA-91, изменялось от 0,22 до 0,27, что близко к значениям этого отношения в "индустриальных" аэрозолях и соответствует высоким значениям, обнаруженным в аэрозоле на побережье Аляски, - до 0,40 [Rosen et al., 1981]. Сажевый углерод, состоящий из субмикронных частиц, может переноситься на большое расстояние от источников [O'Dowd, Smith, 1993]. Его наиболее вероятными источниками в аэрозолях Арктики являются антропогенная деятельность и лесные пожары [Rosen et al., 1981; Conny, Slater, 2002]. Сажевый углерод оказывает сильное воздействие на климатические характеристики Арктического региона за счет влияния на оптические свойства атмосферы и (при осаждении на поверхность) на альbedo подстилающей поверхности. В целом распределение сажевого углерода в атмосфере Арктики отличается высокой пространственной и временной изменчивостью [Hansen et al., 1997; Polissar et al., 1998].

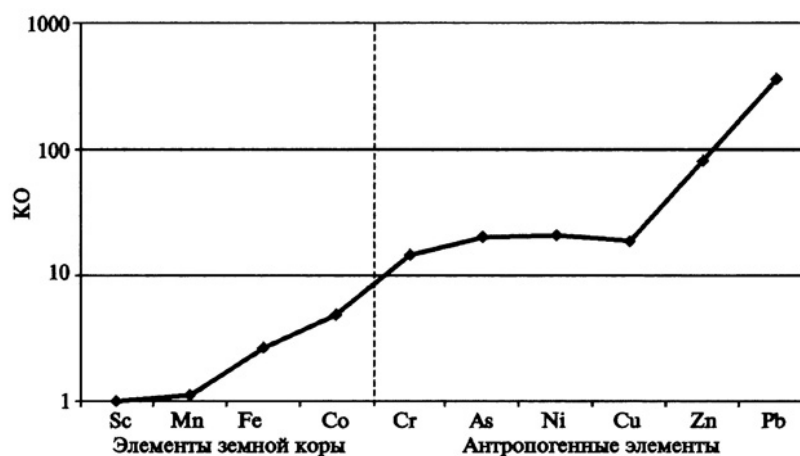


Рис. 1.4.3. Коэффициенты обогащения (КО) разных элементов в сетевых пробах аэрозоля относительно среднего состава земной коры (Taylor, 1964), скандий – реперный элемент

Среднее содержание Si в сетевых пробах 13,4%, а среднее содержание Al 2,66% [Шевченко, 2006]. Используя Al в качестве индикатора терригенного вещества и приняв его среднее содержание в земной коре 8,23% [Taylor, 1964], мы определили содержание терригенной компоненты в аэрозолях Арктики, которое в среднем равно 32,3%, т.е. на биогенную часть приходится 67,7%. Это подтверждается как результатами микроскопических исследований, так и химическими определениями  $C_{орг}$  и ОВ.

Содержание химических элементов в сетевых пробах меняется в широких пределах [Шевченко, 2006]. Для определения происхождения аэрозолей были рассчитаны коэффициенты обогащения (КО) элементов относительно среднего состава земной коры (рис. 1.4.3) по формуле

$$КО = (\text{Эл}/R)_{\text{проба}} / (\text{Эл}/R)_{\text{земн. кора}}$$



где Эл и R - концентрации интересующего нас и реперного элемента (Al или Sc) соответственно в пробе и земной коре [Taylor, 1964].

По значениям КО элементы в изучаемом аэрозоле можно разделить на две группы: 1) терригенные элементы, типичные для земной коры (КО < 10), - Na, Mg, Al, K, Ca, Sc, Mn, Fe, Co, Ni, As, Rb, Cs, Ba, РЗЭ (редкоземельные элементы), Hf, Ta, Th, U; 2) антропогенные элементы (КО > 10) - Cr, Cu, Zn, Se, Br, Ag, Cd, Sb, W, Au, Pb.

Отметим, что в летне-осенний период, когда были выполнены почти все наши исследования, в нерастворенных аэрозольных частицах размером больше 0,5 мкм среди антропогенных элементов особенно высоко (КО > 100) обогащение свинцом.

Уже упомянутая ранее проба, отобранная 18 сентября 1993 г. в Енисейском заливе при сильном (10,4 м/с) южном ветре, имеет самые высокие по сравнению с другими пробами коэффициенты обогащения такими элементами, как Se (КО = 22 000), Ni (КО = 418), Co (КО = 69) и As (КО = 43). В этой же пробе обнаружено и самое высокое содержание сфер стгорания. Сопоставление с данными синоптического анализа показывает, что эта проба является ярким свидетельством поступления по атмосферному каналу антропогенных составляющих из района Норильска в Арктику. Норильский горно-металлургический комбинат, расположенный в Заполярье, - одно из крупнейших в мире предприятий по добыче и переработке медно-никелевых руд - является мощным источником загрязнения атмосферы соединениями S, Se, Cu, Ni, Co, Sb, As, Pb, Zn, Hg [Arctic..., 1997; Арктика..., 2000].

Подчеркнем, что коэффициенты обогащения фильтрационных проб химическими элементами оказываются значительно выше, чем сетевых, отобранных параллельно. Это показывает, что все элементы связаны в том числе с субмикронными частицами, которые слабо улавливаются сетями, и/или входят в состав растворимых аэрозольных частиц разных размеров, которые удаляются с сетей при промывании их бидистиллированной водой. Именно в Арктике, где состав аэрозоля формируется в результате его дальнего переноса, концентрации многих микроэлементов выше в самых мелких фракциях аэрозолей [Duce et al., 1976; Куценогий и др., 2005]. Поэтому изучение гранулометрии аэрозолей в Арктике одновременно дает качественную информацию и о химическом составе вещества.

*Элементный состав с учетом растворимой части.* Рассмотрим элементный состав аэрозолей в пробах, отобранных методом фильтрации. При этом изучался состав частиц крупнее 0,5 мкм, в том числе (в отличие от сетевого метода) частиц морской соли.

Химический состав аэрозолей Арктики характеризуется значительной пространственной и временной изменчивостью [Barrie, Barrie, 1990; Виноградова, 1996; Виноградова, Полиссар, 1995; Maenhaut et al., 1989, 1996; Шевченко и др., 2004; Горюнова, Шевченко, 2007]. В табл. 1.4.1 представлены результаты исследований элементного состава аэрозолей Арктики.

В летний период содержание большинства химических элементов в аэрозолях Российской Арктики соответствует уровню, отмеченному в других районах Арктики. Катастрофического повышения содержания химических элементов (в том числе тяжелых металлов и других антропогенных элементов) в аэрозолях Арктики в летний и осенний периоды нами не обнаружено. При этом подчеркнем, что эти значения на один-два порядка ниже, чем обычно наблюдаемые в Арктике в конце зимы - начале весны [Heintzenberg et al., 1981; Виноградова, 1993; Sirois, Barrie, 1999; Polissar et al., 1998; Quinn et al., 2002]. Исключение составляют районы, близкие к локальным источникам загрязнения (Норильск, Кольский п-ов). Отметим также, что большая часть антропогенных микроэлементов сосредоточена на субмикронных аэрозольных частицах, составляющих 53-79% для V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn [Куценогий и др., 2005], что свидетельствует об их дальнем переносе.

Итак, исследования элементного состава арктических аэрозолей показали следующее.

Таблица 1.4.1  
Концентрации скандия и ряда тяжелых металлов в аэрозолях приземного и приземного слоев атмосферы в Арктике, нг/м³

Район, время	Число проб	Sc	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As	Sb	Pb	Источник
Море Лаптевых, лето 1995 г.	12	0,0081		3,97		142	0,102			15,4	0,38			Шевченко, 2006
Карское море, сентябрь 1993 г.	14	0,00022		0,044		2,81	0,0041			1,58		0,0032		Шевченко и др., 1998а
Желоб Св. Анны и Баренцево море, август–октябрь 1994 г.	10	0,0033		5,66		135	0,30	8,2		43	0,15	0,064		Шевченко, 2006
Норвежское и Гренландское моря, лето 1996 г.	5	0,026		0,665		800		19,1		34,2	0,64	0,098		Виноградова, 1996
Пролив Фрама, лето 1997 г.	8		1,0	0,56	5,0	57		11,1		18,8	0,08	0,16	13	Маenhaut et al., 1996
Центральная Арктика, весна 1987 г.	15			4,6		180		2,2	7,0	14				Виноградова, 1996
Центральная Арктика, август–октябрь 1991 г.	7	<0,003	0,043	<1,1	0,26	10,6	0,019	<0,18	0,16	0,18	0,022	0,019	0,2	Maenhaut et al., 1996
Пролив Фрама, август–октябрь 1991 г.	3	<0,004	0,043	<1	0,085	5,9	0,014	<0,2	<0,15	0,19	<0,06	<0,005	0,3	Виноградова, Полиссар, 1995
Северная Земля, апрель–май 1985, 1986, 1988 г.	22	0,014	0,75	1,6	1,4	31	0,075	6,1	3,8	5,8	1,8	0,19	3,5	Виноградова, 1995
Восточная Арктика, весна 1985–1989 г.	52	0,11	0,86	4,5	3,8	160	0,49	8,1	6,4	16	0,8	0,19	10	Виноградова, 1996
Земля Франца-Иосифа, весна 1994 г.	10		0,7		2,6	19			26	5,2			4,4	Смирнов и др., 1996
Шпицберген, лето 1984 г., зима 1983, 1984 и 1986 г.	13 46	0,0012 0,0043	0,022 0,54	0,56 <0,4	0,07 0,77	5,6 17,8	<0,004 0,0096	<0,2 0,29	<0,3 <0,9	<0,15 3,9	0,01 0,52	0,0024 0,092	<0,7 3	Maenhaut et al., 1989
Канадская Арктика, м. Алерт, март 1985 г.	12	0,01	0,295		0,778	50	0,032			8,5	0,349	0,06		Landsberger et al., 1990
Аляска, ст. Барроу, весна 1986 г.	280					38		4		11				Li, Winchester, 1990
Гренландия, ст. Саммит, лето 1990 г.	29	0,003				9,8	0,011			1,5	0,029			Moshet et al., 1993
Белое море, о. Мудьюгский, май–июнь 2004 г.	30		3,8		4,4	46	0,44	2,8	2,0	3,8			0,91	Шевченко и др., 2006
сентябрь–октябрь 2004 г.	28		5,2		2,9	26	0,33	2,4	1,6	2,9	0,78		1,08	Куленогий и др., 2005
Белое море, август 2004 г.			2,1	2,9	9,0	134	0,7	0,7	8,5	25			3,3	Горюнова, Шевченко, 2007
Архангельск, март 2005 г.			21	2,3	19	85	0,5	5,5	3,7	20			3,2	
Моря Баренцево, Карское и Лаптевых, август–сентябрь 2006 г.								9,6–218		10,4–54,1				

1. Аэрозоли состоят из растворимых и нерастворимых частиц, соотношение и состав которых характеризуются значительной пространственной и временной изменчивостью.

2. Терригенный компонент нерастворимой фракции в среднем составляет около 1/3 массы, тогда как на биогенную часть приходится около 2/3.

3. Основной (по массе) компонент нерастворимого аэрозоля Арктики - это углерод, составляющий  $30,2 \pm 12,5\%$ . Отношение сажевого (поглощающего свет) углерода к общему углероду близко к значению, свойственному аэрозолю промышленно развитых территорий, что свидетельствует о том, что сажа в Арктику поступает от антропогенных источников или с территорий пожаров.

4. В целом содержание большинства терригенных 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 значений, характерных для земной коры. Содержание Cr, Cu, Zn, As, Se, Br, Ag, Sb, Au, Pb значительно выше их средних значений для земной коры, что свидетельствует о преимущественно антропогенном происхождении этих элементов в аэрозоле Арктики. Наиболее существенные источники загрязнения аэрозолей Российской Арктики - ближайшие горно-металлургические комбинаты Норильска, Кольского п-ова, а также лесные пожары; зимой важным фактором является дальний перенос вещества из среднеширотных районов материков.

5. Гранулометрический состав аэрозолей Арктики является одним из важнейших показателей, определяющих их химический состав, что соответствует также данным по водной взвеси, кризолям и донным осадкам [*Лисицын, 1978, 2004a*].

### **Состав снежного покрова в Арктике**

Снег на поверхности льдов в море - это гигантская ловушка аэрозольного и растворенного вещества в зимний период. Снежный покров обладает свойствами, делающими его удобным индикатором состояния экосистемы [*Бояркина и др., 1993; Lisitzin, 2002*].

1. Снег вымывает из атмосферы твердые (аэрозоли) и растворенные (влага и все виды загрязнений) вещества.

2. В отличие от дождя, который уходит в почву или стекает с поверхности льдов, снег сохраняется на поверхности почвы и дрейфующих льдов и таким образом фиксирует все атмосферные выпадения за снежный период года: в Арктике для большей части года, а севернее  $80^\circ$  с.ш. практически для всего года.

3. Осадочное вещество снега (твердое и растворенное) характеризует зимнюю атмосферу, когда окружающая суша покрыта слоем снега, а реки и моря - льдом, т.е. поступление аэрозольного минерального вещества и солей с водных поверхностей отсутствует или минимально. Поэтому главную роль в формировании состава аэрозоля играет вещество дальнего (тыс. км) и сверхдальнего (более 10 тыс. км) переноса [*Лисицын, 1978; Lisitzin, 1996*].

4. В Арктике при отборе всей толщи накопившегося снега (с первого снегопада и до времени отбора) с поверхности льда на большом количестве точек можно определить среднюю скорость его накопления на единицу поверхности. Это позволяет оценить поток аэрозольного и растворенного эолового материала и получить не только качественную, но и количественную характеристику поступления эолового материала на поверхность моря [*Lisitzin, 2002*].

Средние значения содержания нерастворимых частиц в поверхностном слое снежного покрова в фоновых районах Российской Арктики находятся в пределах 0,13-3,2 мг/л (табл. 1.4.2), что значительно выше, чем содержание взвеси в морской воде. Наибольший разброс обнаруженных значений наблюдался в конце 90-х гг. в Центральной Арктике и в проливе Фрама. Наоборот, в 2000-х гг. в районе Северного полюса наблюдалось минимальное содержание частиц в снеге (и минимальные разбросы значений). По результатам оптической и сканирующей электронной микроскопии,

основная часть материала на фильтрах имеет тонкопелитовую (менее 1 мкм) и пелитовую (1-10 мкм) размерность. Сравнительно редко встречаются частицы алевритовой размерности (10-100 мкм), в основном это частицы биогенного материала (диатомеи, волокна и др.). Основными компонентами собранного материала являются минеральные зерна размером от 1 до 10 мкм и биогенные частицы (растительные волокна, пыльца и диатомовые водоросли), принесенные из центральных и северо-западных районов Европы. Соотношение минеральных и биогенных частиц меняется от пробы к пробе. Пресноводные диатомеи присутствуют в большинстве проб, они представлены типичными речными и озерно-болотными видами, характерными для водоемов Крайнего Севера Евразии [Гецен, 1985; Kienel, 1999].

Таблица 1.4.2

**Концентрация нерастворимых частиц в снежном покрове Арктики, мг/л**

Район	Время	Число проб	Концентрация, min-max	Среднее значение	Источник
Архангельск и его окрестности	март 2004 г.	3	1,14–3,80	2,45	Шевченко и др., 2006
	март 2005 г.	20	2,73–22,7	9,54	Шевченко и др., 2007б
	март 2007 г.	6	1,00–10,13	3,82	Данная работа
Архангельск, 1 км от ТЭЦ	март 2005 г.	1		76,7	Шевченко и др., 2007б
г. Лулео, Швеция, спальные районы	январь–апрель 1995 г.			19	Viklander, 1999
Амеразийский бассейн, дрейфующая станция Т-3	март 1970 г.	4	0,67–1,63	1,04	Mullen et al., 1972
Амеразийский бассейн, дрейфующая станция AIDJEX	апрель 1972 г.	22	0,16–1,47	0,36	Darby et al., 1974
Желоб Святой Анны	август 1994 г.	1		0,50	Шевченко и др., 2004
Пролив Фрама	июль 1997 г.	11	1,03–12,91	2,74	Шевченко и др., 2002
Центральная Арктика	июль 1998 г.	32	0,43–16,37	2,91	Шевченко и др., 2007а
Желоб Франц-Виктория	сентябрь 1998 г.	3	2,6–4,3	3,2	Саввичев и др., 2001
Губа Чупа, Белое море	март 2001 г.	4	0,5–1,6	0,78	Шевченко и др., 2007а
	апрель 2002 г.	3	0,40–3,10	1,91	Шевченко, 2006
	март–апрель 2004 г.	16	0,33–2,63	0,84	Шевченко и др., 2007а
Район Северного полюса, российские дрейфующие станции	апрель 2001 г.	4	1,25–2,00	1,51	
	апрель 2002 г.	2	0,22–0,50	0,36	
	сентябрь 2003 г.–февраль 2004 г. (СП-32)	7	0,18–0,69	0,37	
	октябрь 2004 г.–май 2005 г. (СП-33)	5	0,10–0,17	0,13	
Район Северного полюса, экспедиция ПАЛЭКС	апрель 2007 г.	4	0,20–0,75	0,51	Данная работа
Кенозерский национальный парк, Архангельская область	январь 2001–2004 гг.	5	1,00–2,00	1,46	Чурсин, 2004
Горло Белого моря	апрель 2003 г.	2	1,58–3,07	2,33	Кособокова и др., 2004

Во всех пробах снега, как и в пробах аэрозолей, в небольшом количестве обнаружены гладкие сферы сгорания диаметром 0,5-10 мкм, поступающие в атмосферу с выбросами металлургических, горнодобывающих комбинатов, тепловых электростанций,

ТЭЦ. Набор минералов (кварц, кислые плагиоклазы, калиевые полевые шпаты, гиперстен, фрагменты сланцев, хлорит), найденных в пробах снега, свидетельствует о достаточно широком спектре пород, являющихся источником эолового материала, поступающего со снегом на поверхность льда. Это в основном щелочные породы, гранитоиды, а также метаморфические породы.

По мере приближения к источникам антропогенных выбросов в атмосферу в составе снега увеличивается количество нерастворимых частиц (табл. 1.4.2). Вблизи источников снежный покров испытывает повышенные антропогенные нагрузки, в нем накапливаются и перераспределяются токсичные химические соединения и элементы [Шевченко и др., 2007а], впоследствии влияющие и на другие природные объекты [Larsen, 2003].

Таким образом, снег в Арктике, являясь естественной ловушкой эолового материала, накапливает аэрозольное вещество и способствует формированию временных и пространственных неоднородностей попадания аэрозольных частиц в воды и далее в донные осадки СЛО.

### **Влияние аэрозоля на морское осадконакопление и окружающую среду в Арктике**

**Оценка потоков эолового материала в Арктике.** 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 в работе [Smirnov et al., 1996], на удалении от берегов гранулометрический состав аэрозолей меняется очень мало, что упрощает определение значений вертикальных потоков. Данные по минеральному и химическому составу, приведенные выше, могут быть пересчитаны в значения вертикальных потоков как аэрозолей в целом, так и различных минералов и химических элементов (в том числе загрязняющих веществ). Этот подход, сопряженный с допущениями, дает ориентировочные значения потоков. Он может быть дополнен и проверен прямыми определениями потоков, которые выполняются при изучении толщи снега, льда и донных осадков. Возможно также определение потоков вещества из атмосферы при непосредственном сборе осадков с помощью различных ловушек, специальных бассейнов и др. Кроме того, за последние годы все большее развитие получают методы изотопного анализа ( $^{210}\text{Pb}$ ,  $^7\text{Be}$  и другие космогенные изотопы) потоков вещества в атмосфере [Kim et al., 2000].

Поток эолового материала, поступающего на поверхность морей Российской Арктики при сухом осаждении, был рассчитан нами с допущением того, что скорость осаждения нерастворимых крупных (более 1 мкм) частиц, составляющих главную по массе часть аэрозолей, равна 2 см/с, как это принято в ряде работ [Duce et al., 1991]. Рассчитанные таким образом потоки аэрозольного вещества на поверхность в Арктике (за счет сухого осаждения) составляют от 0,03 до 1,68 мг/м<sup>2</sup> в сутки (в среднем 0,39 мг/м<sup>2</sup> в сутки или 142 мг/м<sup>2</sup> в год).

Допуская, что сухое осаждение составляет 1/4 суммарного [Rahn, 1981], и распространяя наши летние данные по содержанию аэрозолей над СЛО на весь год, получаем суммарный поток эоловой взвеси около 570 мг/м<sup>2</sup> в год (1,56 мг/м<sup>2</sup> в сутки). При этом было учтено, что в теплое время содержание аэрозолей в несколько раз ниже, а количество атмосферных осадков в 3-4 раза выше, чем в зимние и весенние месяцы [Barrie, Barrie, 1990; Sirois, Barrie, 1999; Quinn et al., 2002; Северный..., 1985].

Можно оценить поток эолового материала на поверхность дрейфующих льдов Арктики другим способом - по среднему содержанию взвеси в свежевыпавшем снеге, принятому равным 2,19 мг/л (среднее по 87 определениям) по данным работ [Mullen et al., 1972; Darby et al., 1974; Pfirman et al., 1989; Шевченко и др., 2006] и среднегодовому количеству атмосферных осадков в Северном Ледовитом океане 285 мм [Северный. ..., 1985]. По этим данным, поток составляет 624 мг/м<sup>2</sup> в год (1,71 мг/м<sup>2</sup> в сутки).

Более низкие значения потока эолового материала были экспериментально получены в 1994 г. на станции Нью-Алесунн на Шпицбергене [Kriews, Schrems, 1995] еще одним независимым методом с помощью осадкомера-212 мг/м<sup>2</sup> в год (0,58 мг/м<sup>2</sup> в сутки).

В результате, по нашей оценке, среднее значение вертикального потока нерастворимых аэрозолей в Арктике составляет примерно 600 мг/м<sup>2</sup> в год [Shevchenko, Lisitzin, 2003], что значительно выше, чем считалось ранее (140 мг/м<sup>2</sup> в год) [Darby et al., 1989]. Полученная оценка, безусловно, требует дальнейшего уточнения. В частности, необходимо иметь в виду, что эффективность захвата аэрозолей жидкими (дождь) и твердыми (снег) осадками разная, что пока не было учтено при оценках.

Для сравнения атмосферного и речного каналов поступления вещества в СЛО оценим общее поступление аэрозолей (нерастворимая часть) в Северный Ледовитый океан (площадь 9,54 млн км<sup>2</sup>), которое составляет около 5,7 млн т в год [Shevchenko, Lisitzin, 2003]. Это много ниже, чем поставка взвешенного материала реками (около 245 млн т в год) [Gordeev et al., 1996; Гордеев, 2004]. Однако следует иметь в виду, что главная часть речных взвесей осаждается в маргинальных фильтрах на границе река-море (Лисицын, 1994б, 2004б). За пределы фильтра проникает только около 7%, а области континентального склона достигает примерно 5%, т.е. в центральные воды СЛО и его морей проникает только 12 млн т взвеси рек.

С точки зрения воздействия на окружающую среду очень большое значение имеет поступление из атмосферы органического вещества [Rachold et al., 2003], а также антропогенных микроэлементов (Pb, Sb, Se, V, Zn и др.), для которых в Центральной Арктике атмосферный источник главный [Rahn, 1981; Akeredolu et al., 1994].

Оценим вклад аэрозолей в состав донных осадков СЛО. Принимая среднее значение плотности поверхностного слоя донных осадков равным 1,6 г/см<sup>3</sup> [Darby et al., 1974] и то, что содержание терригенного материала в нерастворимой фракции аэрозоля составляет 32,3%, можно рассчитать, что выпадающие аэрозольные частицы в среднем образуют слой от 0,00004 до 0,00013 мм в год. Скорость осадконакопления в Центральной Арктике, по разным оценкам, составляет от 0,001 до 0,0146 мм в год [Darby et al., 1974, 1989], следовательно, доля эолового материала в поверхностном слое донных осадков составляет 0,35-3,5%. С учетом вклада  $C_{орг}$  и биогенных веществ, по нашим оценкам, вклад аэрозолей в седиментацию в Арктике составляет не менее 10%.

**Аэрозоли осаждаются на снег и на лед.** Вклад аэрозолей в формирование природной среды Арктики значительно больше и разнообразнее, чем это представлялось ранее. Прежде всего, это касается общего количества аэрозольного материала, выпадающего из атмосферы, и его распределения по площади океана и по сезонам года.

Летом при слабом воздействии антропогенного фактора в Арктике четко выявляется глобальный аэрозольный фон. Он определяется в основном алюмосиликатами (матрица земной коры), к которым в летнее время добавляются еще морская соль и растительные остатки с суши. Глобальный аэрозоль имеет, как отмечалось, достаточно постоянный гранулометрический, минеральный и химический состав [Лисицын, 1978].

Весной и зимой сказывается вторичное (непрямое) участие аэрозолей в формировании состава окружающей среды в северных полярных районах. Нерастворимые аэрозольные частицы оседают на поверхность в Арктике в основном с атмосферными осадками, которые чаще всего представлены снегом, т.е. твердые частицы оседают главным образом с твердыми атмосферными осадками и фиксируются на поверхности. В этом заключается коренное отличие Арктики от других регионов, где аэрозоли в основном оседают с дождями и твердые частицы смываются водами и сразу перераспределяются по поверхности. Вещество, попавшее на заснеженную поверхность в ходе сухого осаждения, также фиксируется снегом, замерзает вместе с ним и тает только весной в период таяния снежного покрова.

Питание рек, впадающих в СЛО, преимущественно снеговое, для рек Сибири 50-80% [Исаченко, Шляпников, 1989]. В результате количество и состав речной взвеси в момент таяния снега в значительной степени определяются количеством и составом

аэрозольного вещества, выпавшего из атмосферы и накопившегося в снеге за зиму. При весеннем таянии воды скатываются с замерзшей поверхности почвы, и влияние состава самой почвы и коры выветривания на состав талых вод начинает сказываться только в самом конце паводка. Таким образом, состав речных вод (взвесей в первую очередь) в Арктике определяется в значительной мере составом снега - главного агента выведения аэрозолей из атмосферы в долгие зимние месяцы.

Другая особенность касается ледового покрова Арктики, на который каждый год выпадает снег слоем 30-40 см [*Северный...*, 1985; *Радионов и др.*, 1996]. Летом снег на поверхности льда стаивает, возникают снежницы, на дне которых идет концентрирование аэрозольного вещества из талых вод [*Pfirman et al.*, 1989]. Пресная вода, стекающая со льдов в трещины и промоины, снова быстро замерзает, наращивая нижнюю часть льдин (аэрозоль переходит в криозоль), так как температура морских вод в полыньях и под дрейфующими льдами отрицательная (около  $-1,7$  °C). Аэрозольный материал оказывается тесно связанным со всей толщей дрейфующих льдов. Такое вмерзание нерастворимых частиц в паковые (многолетние) льды происходит многократно, и постепенно вещество из атмосферы со снегом и водой входит в их толщу. Нередко эта экспозиция длится до 10-15 лет [*Pfirman et al.*, 1989, 1990; *Eicken et al.*, 1997]. За это время паковые льды пересекают всю Центральную Арктику и достигают областей таяния в Северной Атлантике. Таким образом, ледовый покров Арктики является аккумулятором аэрозольного вещества и его медленным дальним переносчиком (на тысячи километров). Вмороженный в лед аэрозольный материал концентрируется сначала в водной взвеси, а затем в донных осадках в местах таяния (разгрузки) льдов [*Лисицын, 1994a; Lisitzin, 2002*]. Таким образом, вся площадь СЛО, покрытая льдом, - это глобальная ловушка аэрозольного вещества, которое переходит в воду и донные осадки в термодепозитрах - на фронте таяния льдов, совпадающем с положением изотерм поверхностных вод от 0 до  $+2$  °C. Разгрузка однолетних льдов не связана с их многолетним дрейфом: она идет по фронту их весеннего таяния, т.е. между границами минимального и максимального их распространения.

В результате пространственное распределение доли аэрозольного материала в воде и донных осадках СЛО оказывается неравномерным. Простое осаждение аэрозолей из атмосферы на поверхность океана пропорционально их содержанию в приземном воздухе, а выше - вблизи материков. Основная часть аэрозольного материала, вмерзшего в лед, вытает из него главным образом в термодепозитре Гренландского моря. В зоне маргинальных фильтров рек вклад аэрозолей увеличивается благодаря их добавлению в состав речной взвеси с талыми водами.

**Аэрозоли влияют на растительность и живые организмы в Арктике.** Для экосистем Арктики огромное значение имеет аэрозольная поставка биогенных элементов (P, N, S), а также железа и других элементов, необходимых для жизни, поскольку их поступление с речным стоком здесь незначительно [*Gordeev et al.*, 1996]. Последнее связано с отсутствием в Арктике в почвах азотобактера (при низких температурах), а также со слабым развитием химического выветривания [*Ugolini, 1986*].

Именно аэрозоли обеспечивают цветение фитопланктона в снежницах на поверхности льдов, а также расцвет жизни на кромках льдов, где идет их массовое таяние (явление MIZ - marginal ice zone) [*Smith, 1987*], и не только в море, но и в водоемах арктической суши.

Аэрозоли регулируют первичную продукцию Арктики, биогеохимические процессы не только в воде, но и на суше, например обеспечивают бескорневое атмосферное питание лишайников. Лишайники, являющиеся симбиозом водоросли и гриба, получают необходимую влагу, биогенные вещества и микроэлементы преимущественно из атмосферы. Поскольку лишайники обладают большой площадью поверхности, они являются естественными биосорбентами [*Бязров, 2002*] и могут рассматриваться как индикаторы ряда антропогенных составляющих в воздухе Арктики.

Поступление аэрозолей имеет очень большое значение при формировании арктических ландшафтов, поскольку суровые климатические условия затрудняют взаимодействие растительности с минеральным субстратом и подавляют гипергенное разложение минералов [Добровольский, 1998].

Кроме положительного аэрозоли оказывают на природную среду Арктики и отрицательное воздействие, перенося загрязняющие вещества в Арктику из более южных широт [Barrie, Barrie, 1990; Vinogradova, 2000; Виноградова, Пономарева, 2001, 2007]. Очень хрупкое равновесие между физическими, химическими и экологическими параметрами Арктики, определяемое высокой чувствительностью к изменениям и очень низкими скоростями восстановления биологических ресурсов, делают Арктику особенно уязвимой по отношению к загрязнению [Arctic..., 1997; Арктика..., 2000]. Однако в июле-сентябре катастрофического повышения содержания химических элементов в аэрозолях Арктики в связи с антропогенным влиянием нами не обнаружено. На основании геохимических исследований удалось выявить главные регионы - источники загрязнений российской части Арктики (Норильск, Кольский п-ов), влияние которых заметно в зимнее время также в канадском и американском секторах Арктики [Rahn et al., 1983; Sirois, Barrie, 1999].

### **Модельные оценки антропогенной нагрузки на экосистемы морей Российской Арктики (атмосферный канал)**

Модельные оценки переноса в атмосфере антропогенных стойких экотоксикантов - один из важных аспектов изучения состояния окружающей среды. Однако ценность этих оценок ограничена ненадежностью и явной недостаточностью данных о выбросах в атмосферу антропогенных примесей в регионах-источниках, а также данных о параметрах выведения примеси из атмосферы по пути ее распространения с воздушными массами. Особые методические трудности для таких исследований обусловлены протяженностью источников и многообразием условий циркуляции атмосферы, формирующих воздушные потоки примесей. Поэтому расчеты с высоким пространственным и временным разрешением очень трудоемки и длительны [Ровинский и др., 1994].

Предположение малых размеров источников по сравнению с дальностью распространения примеси позволяет достаточно просто решить задачу оценки средних антропогенных воздействий через атмосферу на арктические территории по средним характеристикам переноса примеси воздушными массами. Такой подход (при анализе обратных траекторий переноса воздуха) использовался нами для оценки загрязнения окружающей среды на островах СЛО [Виноградова, Пономарева, 2001, 2007] и в центральной части моря Лаптевых [Виноградова и др., 2002, 2003].

Далее приводятся результаты модельных оценок среднего антропогенного воздействия на состав аэрозоля, осадков и выпадающего на поверхность вещества в Российской Арктике в последние 20 лет XX в. со стороны ближайших крупных промышленных регионов Кольского п-ова и Норильска.

**Исходные данные и методика оценок.** Исходным материалом для изучения распространения примеси от двух условных точечных источников (Кольский - 69° с.ш., 31° в.д.; Норильск - 69° с.ш., 88° в.д.) являлись 5-суточные траектории движения воздушных масс для каждого дня января, апреля, июля и октября с 1981 по 2000 г. Расчет траекторий осуществлялся на изобарических поверхностях 925 и 850 гПа (старт в 0 часов GMT, интервал расчетов 1 час) с помощью модели HYSPLIT 4 и данных реанализа полей метеорологических характеристик NCEP/NCAR [Draxler, Rolph, 2003]. Пространственные распределения плотности числа траекторий и концентрации примеси в воздухе строились на координатной сетке (1x1°) для каждого месяца за 10 лет отдельно для 80-х и 90-х гг. Рассматривался перенос воздушными массами Ni, Si, Pb, Cd, являющихся маркерами различных процессов человеческой деятельности (в частности Cu-Ni-производство в Арктике). Считая рассматриваемые месяцы представительными для каждого сезона, изучались внутригодовые вариации приземной концентрации ТМ и их потоков на



поверхность, а среднегодовые показатели вычислялись усреднением в предположении равной длительности сезонов. Долговременные тенденции изменения характеристик оценивались при сравнении результатов для 80-х и 90-х гг.

В силу специфики промышленности рассматриваемых регионов-источников они являются мощными эмиттерами в атмосферу никеля и меди на севере Евразии, определяющими антропогенный вклад этих элементов в природные среды и объекты окружающих территорий. Значения мощности выбросов ТМ в атмосферу в городах Мурманской области и в Норильске были взяты из сборников Гидрометслужбы России [Ежегодник..., 1990, 1998] и аналогичных изданий 1996 и 2001 гг. По этим данным, эмиссия ТМ в районах рассматриваемых источников в 90-х гг. уменьшилась почти вдвое по сравнению с 80-ми годами XX в.

Подход к оценкам распространения примеси при ее дальнем переносе в атмосфере был аналогичен описанному в работах [Виноградова, Пономарева, 2001; Ровинский и др., 1994]. Считалось, что вблизи источника (в радиусе 20-50 км) происходит осаждение около 20% примеси, а остальные 80% вовлекаются в дальний перенос. При этом по вертикали примесь распределена равномерно в пределах приземного слоя перемешивания (около 1 км). По мере удаления от источника происходит экспоненциальное убывание примеси в воздушном потоке за счет ее осаждения на поверхность с соответствующей скоростью. Поскольку при дальнем переносе все рассматриваемые химические элементы распространяются в воздухе преимущественно на аэрозольных частицах субмикронного размера, скорости их осаждения на подстилающую поверхность считались одинаковыми и неизменными по мере распространения от источника. Учитывались сезонные и пространственные вариации скорости осаждения примесей. При этом скорости сухого осаждения субмикронного аэрозоля над различными подстилающими поверхностями задавались исходя из литературы [Ровинский и др., 1994, 1995; Расуна et al., 1984, 1985], а скорости осаждения осадками рассчитывались по многолетним данным о количестве и агрегатном состоянии осадков в северных районах России и над поверхностью рассматриваемых морей [Брызгин, 1998; Формирование..., 2004].

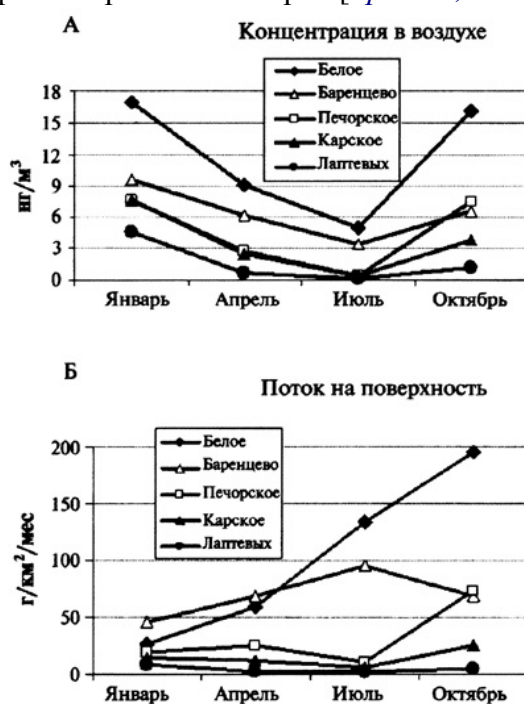


Рис. 1.4.4. Сезонный ход концентрации примеси в воздухе (А) и ее потока на поверхность (Б) в акваториях морей Белого, Баренцева, Печорского, Карского и Лаптевых на примере средних (за 90-е гг.) показателей для никеля, перенесенного в атмосферу от Кольского п-ова и района Норильска

**Средние концентрации ТМ в воздухе и их потоки на поверхность морей.** На рис. 1.4.4 на примере никеля в 90-х гг. показаны сезонные изменения концентрации примеси в воздухе и потока примеси на единицу поверхности, обусловленные только атмосферным переносом от рассматриваемых источников, над поверхностью российских арктических морей. Для атмосферной концентрации примеси характерны максимальные значения в холодную часть года (зимой и весной), а выпадения на поверхность, наоборот, больше осенью. Эти сезонные различия определяются главным образом изменением в течение года количества и агрегатного состояния осадков, а также изменением качества подстилающей поверхности (открытая вода, лед, снег на льду и др.), влияющих на величину скорости осаждения примеси на подстилающую поверхность. Абсолютные значения амплитуды сезонных вариаций как атмосферной концентрации, так и потока на поверхность различны для разных морей. Амплитуда сезонного хода атмосферной концентрации примеси максимальна над Белым морем, а минимальна над морями Баренцевым и Лаптевых. Второе обстоятельство кажется

неожиданным из-за того, что эти два моря сильно отличаются друг от друга не только площадью, но и климатическими характеристиками, определяющими сезонный ход скорости осаждения примеси на поверхность. Однако большое по площади Баренцево море охватывает территории с разными условиями загрязнения и очищения атмосферы, что сглаживает средний (для всего моря) сезонный ход. Море Лаптевых, наоборот, характеризуется наиболее однородными климатическими условиями как на всей своей территории, так и в течение всего года.

Рисунок 1.4.5 показывает пространственные вариации среднего (за год) удельного потока никеля, принесенного воздушными массами от рассматриваемых источников, на территориях морей Белого, Баренцева, Карского и Лаптевых в 90-х гг. XX в. Таким образом, на Белом море наиболее загрязненными оказываются воздух, поверхностные воды и прибрежные территории Кандалакшского залива (поток примеси на поверхность приблизительно вдвое больше, чем в Горле), а остальные части загрязнены приблизительно равномерно. Баренцево море загрязняется неравномерно по площади. Наибольшее содержание ТМ в воздухе и потоках вещества на поверхность, естественно, в ближайшей к источнику прибрежной зоне около Кольского полуострова. Там за год на площадь около 120 тыс. км<sup>2</sup> (меньше 10% площади моря) осаждается до 50% от количества примеси, выпадающей на всю территорию моря. Моря Карское и Лаптевых загрязняются меньше и более равномерно по площади, при этом море Лаптевых наименее подвержено воздействию со стороны рассматриваемых регионов-источников.

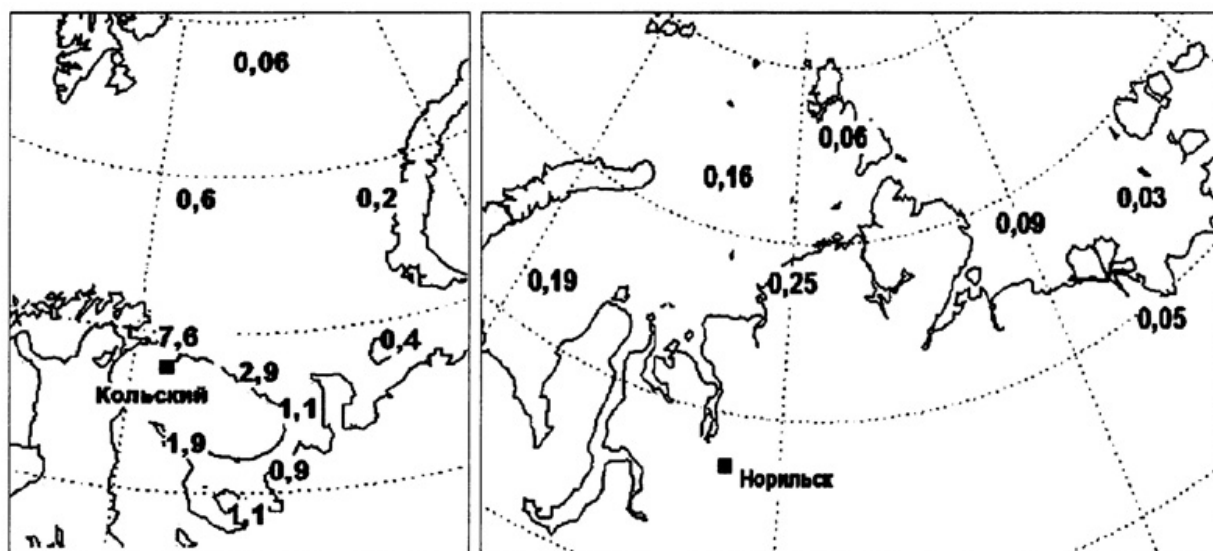


Рис. 1.4.5. Пространственное распределение потока антропогенного никеля (кг/км<sup>2</sup> в год), принесенного в атмосферу от источников, на поверхность морей Белого, Баренцева, Карского и Лаптевых в 90-х гг.

Если сравнить эффективность «сухого» осаждения и осаждения осадками, то, по нашим оценкам, в целом за год с осадками выпадает около 40-45% примеси на поверхность морей Карского и Лаптевых и 30-35% на поверхность Белого и Баренцева морей. Оставшиеся доли примеси выпадают на поверхность морей в результате так называемого «сухого» осаждения. Эти значения ниже, чем предполагалось в работе [Rahn, 1981] и в данной работе при расчетах потоков эолового вещества на поверхность СЛО, что связано в первую очередь с параметризацией эффективности захвата аэрозольных частиц твердыми и жидкими осадками. При модельных оценках эти параметры минимальны, поскольку изначально рассматриваются только антропогенные ТМ, которые над СЛО сосредоточены в основном на аэрозолях субмикронных размеров.

Полученные оценки средней концентрации ТМ в приземном воздухе и в осадках, а также средних потоков ТМ на поверхность хорошо согласуются с приведенными в литературе данными натурных наблюдений на побережье и над водной поверхностью

морей [Голубева и др., 2002, 2006; Куценогий и др., 2005; Koutzenogii et al., 2004; Виноградова и др., 2002], на Шпицбергене [Berg et al., 1996], а также на российских арктических островах [Виноградова, Полиссар, 1995; Виноградова, 1996].

**Изменения нагрузки через атмосферу.** Долговременные (за 20 лет в конце XX в.) изменения антропогенной нагрузки на экосистемы морей через атмосферный канал обусловлены двумя основными факторами: 1) изменением процессов циркуляции воздушных масс и путей переноса примесей; 2) уменьшением эмиссии источников загрязнений (почти на 50%). Эти эффекты в разные сезоны и в разных районах могут быть разной величины и знака. В результате в 90-х гг. (по сравнению с 80-ми) загрязнение акваторий всех морей от рассматриваемых источников уменьшилось, причем для Белого моря изменение мало, тогда как для Печорского и Карского морей эффект составил около 35%, для морей Лаптевых и Баренцева соответственно около 28 и 45%.

**Таблица 1.4.3**

**Средние потоки ТМ (т/год) на поверхность российских арктических морей в 1990-х гг.**

Металл	Белое море	Баренцево море	Печорское море	Карское море	Море Лаптевых
Ni	113	1190	96	77	37
Cu	71	775	66	92	60
Pb	5,6	60	4,7	2,9	1,0
Cd	1,8	17	1,4	1,7	1,0
% от эмиссии	5,6	59,6	3,3	2,6	4,0
Источники	Кольский	Кольский	Кольский+Норильск	Кольский + Норильск	Норильск

**Атмосферный и речной потоки тяжелых металлов.** В табл. 1.4.3 приведены годовые потоки антропогенных ТМ, поступающих по атмосферному каналу от Кольского п-ова и района Норильска, на поверхности морей Российской Арктики. Природные объекты акватории Белого и Баренцева морей находятся под антропогенной нагрузкой со стороны Кольского п-ова, а акватории моря Лаптевых - преимущественно со стороны Норильска, над Карским морем происходит смена лидирующего источника загрязнений. В отношении загрязнения свинцом рассматриваемые регионы-источники не являются основными для всех арктических морей. Наиболее значимыми антропогенными источниками Pb и V являются регионы с активно функционирующим авиационным и автомобильным транспортом, которые расположены в Центральной и Восточной Европе, а также районы с интенсивным сжиганием каменного угля, нефтепродуктов и дров. Именно эти территории в значительной степени влияют на содержание свинца и ванадия в атмосфере и осадках полярных областей России [Виноградова, Пономарева, 2001].

Рисунок 1.4.6 показывает, что в целом годовой поток антропогенных Ni, Cu и Cd из атмосферы в воды арктических морей России вполне сравним с потоком этих же элементов во взвеси наиболее крупных впадающих рек [Гордеев, 2004; Геоэкология..., 2001] после очищения в зоне маргинального фильтра [Лисицын, 1994б, 2004б]. Следовательно, атмосферный канал, обеспечивающий поступление антропогенных ТМ в центральные воды российских арктических морей и, по-видимому, всего СЛО, играет заметную роль в формировании состава морских вод, льдов и донных осадков в Арктике.

В условиях глобального потепления процессы циркуляции атмосферы в Северном полушарии изменились таким образом, что роль атмосферы как канала поступления загрязнений в Арктический регион несколько уменьшилась [Виноградова, Пономарева, 2007]. При этом все большее количество вредных веществ, выбрасываемых в атмосферу в крупных промышленных регионах, осаждаются на поверхность, не доходя до самых северных областей, загрязняя почву и водные объекты в среднеширотных и приарктических районах. Кроме того, оттаивание почвы на части территорий, прежде

относящихся к зоне вечной мерзлоты, должно сопровождаться попаданием аккумулированных там (за многие годы) антропогенных составляющих в воды рек, впадающих в моря Северного Ледовитого океана [Израэль и др., 2002]. Поэтому в настоящее время роль речного стока как поставщика загрязнений в окружающую среду Арктики в целом возрастает.

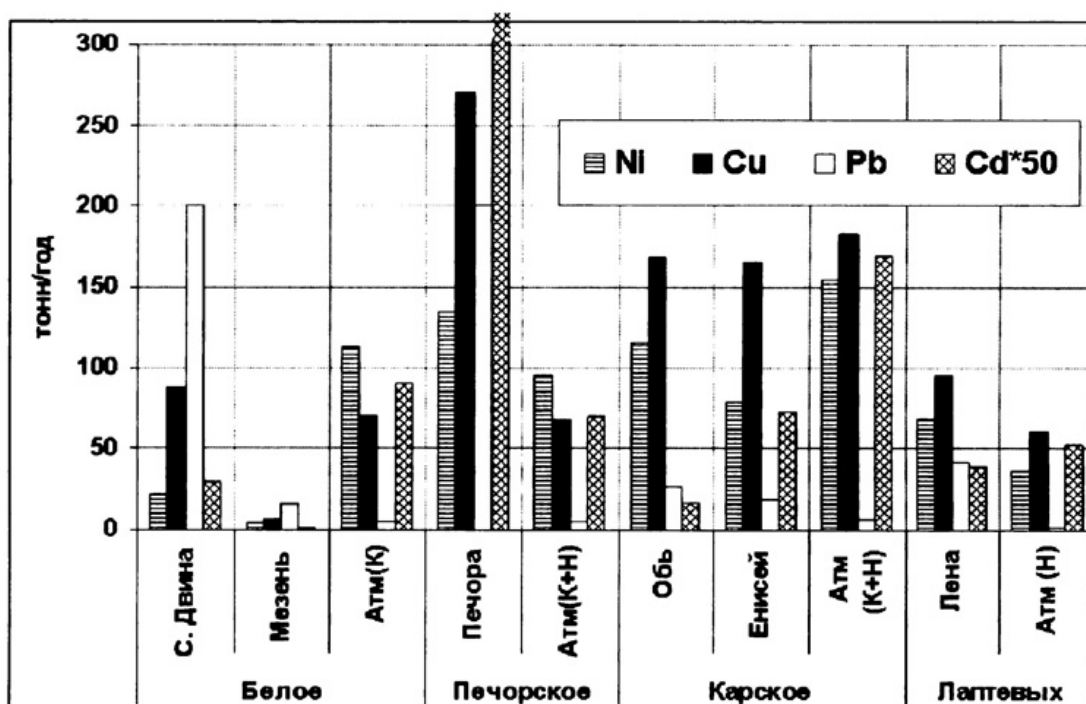


Рис. 1.4.6. Годовые потоки тяжелых металлов, поступающих из атмосферы (только антропогенная часть от Кольского п-ова и Норильска) и с речной взвесью (за пределами маргинальных фильтров), по данным работ (Гордеев, 2004; Геоэкология..., 2001), в воды арктических морей России

## Выводы

1. Применение нескольких взаимно дополняющих методов исследования аэрозолей и снега на поверхности льдов позволило определить количественное содержание и потоки аэрозольного материала в Арктике вплоть до Северного полюса, его гранулометрический, минеральный и химический состав, выделить антропогенные составляющие и районы их эмиссий. Выявлены и применены многочисленные маркеры аэрозольного материала, использование которых позволяет определить его происхождение, траектории переноса и участки отложения (депоцентры).

2. Коренным отличием эолового материала в Арктике является то, что основное его поступление и осаждение на поверхность происходят в условиях зимы, когда поверхность питающих провинций скрыта слоем снега и скована льдом. В этом случае главное значение имеют аэрозоли дальнего и сверхдальнего происхождения, которые и формируют состав арктического аэрозоля, о чем свидетельствуют многочисленные маркеры. В других климатических зонах материал дальнего и сверхдальнего переноса существенно разбавляется большим количеством местного материала.

3. Осаждение аэрозолей в арктических морях и Центральной Арктике идет не на водную поверхность, как в других зонах, а на поверхность льдов. В зоне паковых льдов круглогодичная аккумуляция эолового материала на льдах происходит в течение 3-15 лет. Разгрузка аэрозолей паковых льдов идет в местах таяния льдов - в северной части Гренландского моря - именно здесь выявляется наибольшее их поступление в донные осадки.

4. Балансные оценки, проведенные на основе наших экспериментальных определений, и модельные оценки переноса тяжелых металлов от ближайших

промышленных районов показывают, что вклад аэрозолей в формирование осадочного материала в Арктике близок к вкладу речного осадочного вещества (за пределами маргинальных фильтров рек). Для многих антропогенных элементов (Pb, Sb, Se, V и др.) главным является аэрозольный источник. В целом для Северного Ледовитого океана (пелагиаль) вклад аэрозолей в осадкообразование составляет не менее 10%.

5. Велика роль эолового материала в поставке органического вещества и биогенных элементов, необходимых для существования и жизнедеятельности ряда экосистем в Арктике, - это дополнительный путь поставки биогенов в высокие широты.

6. Исследования литологии и геохимии снежного покрова (в Центральной Арктике он удерживается 9-10 месяцев в году) - естественного коллектора как растворенного, так и взвешенного эолового материала - позволяют выявить новые аспекты взаимодействия аэрозолей с различными природными объектами в Арктике. Через снег и лед (как депонирующие среды) арктические аэрозоли оказывают вторичное воздействие на окружающую среду, что повышает значение эолового переноса вещества для арктических экосистем.

7. Анализ многолетних данных о распространении воздушных масс и загрязнений в Арктику показывает, что производственная деятельность человека в Заполярье значительно влияет на содержание антропогенных тяжелых металлов в воздухе, в осадках и донных отложениях морей и водоемов, а также в других природных объектах Арктического региона, повышая концентрации экотоксикантов в трофических цепях различных экосистем евразийского сектора Арктики.

Некоторое ослабление в конце XX в. воздушного канала загрязнения Арктического региона (за счет перестройки циркуляции атмосферы) может привести к возрастанию роли в этом процессе речного стока, поскольку примеси из атмосферы будут осаждаться еще в приполярных районах на территории водосборов рек, впадающих в Северный Ледовитый океан.

8. Весь осадочный материал, включая загрязняющие вещества, фиксируется в толще донных осадков - уникальном природном самописце. Это не только подчеркивает необходимость одновременного изучения микро- и нановещества атмосферы, криосферы, литосферы и седиментосферы, но и дает замечательную возможность изучения вещества в этих геосферах во времени, т.е. открывает век четырехмерных (4-D) исследований природной среды и климата. Соответствующие исследования начаты нами в последние годы.

Авторы благодарны коллегам, принимавшим участие в совместных исследованиях аэрозолей в арктических морях: В.М. Купцову, В.Н. Лукашину, Г.И. Иванову, И.А. Мельникову, О.В. Севериной, М.А. Бизину, В.С. Козлову, В.В. Польшину, В.В. Серовой, В.В. Смирнову. Мы признательны Л.В. Деминой, А.Б. Исаевой, В.А. Карлову, Н.В. Политовой, Е.И. Поляковой, принимавшим участие в лабораторных исследованиях. Авторы благодарят В.Я. Бергера, Л.Ю. Васильева, Ю.С. Долотова, В.Б. Коробова, К.П. Куценого, И.А. Немировскую, М.В. Панченко, В.Т. Соколова, Й. Тиде (J. Thiede), Р. Штайна (R. Stein), Х. Кассенс (H. Kassens), М. Кривса (M. Kriews) за их поддержку.

Работа выполнялась при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 96-05-00043, 07-05-00691, 08-05-00860), российско-немецкой Лаборатории им. О.Ю. Шмидта, Отделения наук о Земле РАН (проект "Наночастицы во внешних и внутренних сферах Земли"), Программ № 16/2 и 17 президиума РАН, гранта поддержки ведущих научных школ НШ-361.2008.5.

## ЛИТЕРАТУРА

Арктика на пороге третьего тысячелетия (ресурсный потенциал и проблемы экологии). СПб.: Наука, 2000. 247 с.

*Бардин В.И., Евсеев А.В., Астратов М.Ю. и др.* Химический состав снежного покрова дрейфующих льдов // Результаты первой научной экспедиции в приполюсном

районе на атомном ледоколе «Сибирь» / Под ред А.Н. Чилингарова, Б.А. Крутских. Л.: Гидрометеиздат, 1990. С. 82-93.

*Брызгин Н.Н.* Характеристики осадков в Российской Арктике, влияющие на удаление загрязнений из атмосферы // Тр. ААНИИ. СПб.: Гидрометеиздат, 1998. Т. 439. С. 135-148.

*Бязров Л.Г.* Лишайники в экологическом мониторинге. М.: Научный мир, 2002. 336 с.

*Виноградова А.А.* Микроэлементы в составе арктического аэрозоля (обзор) // Изв. АН ФАО. 1993. Т. 29. №4. С. 437-456.

*Виноградова А.А.* Элементный состав атмосферного аэрозоля Восточной Арктики // Изв. АН ФАО. 1996. Т. 32. № 4. С. 479-486.

*Виноградова А.А., Полиссар А.В.* Элементный состав аэрозоля в атмосфере центральной части Российской Арктики // Изв. АН ФАО. 1995. Т. 31. № 2. С. 264-274.

*Виноградова А.А., Пономарева Т.Я.* Сезонные изменения атмосферных концентраций и выпадений антропогенных примесей в Российской Арктике // Изв. АН ФАО. 2001. Т. 37. № 6. С. 761-770.

*Виноградова А.А., Пономарева Т.Я.* Источники и стоки антропогенных микроэлементов в атмосфере Арктики: тенденции изменения с 1981 по 2005 г. // Оптика атмосферы и океана. 2007. Т. 20. № 6. С. 471-480.

*Виноградова А.А., Шевченко В.П., Пономарева Т.Я., Клювиткин А.А.* Вклад атмосферных аэрозолей в загрязнение вод моря Лаптевых // Оптика атмосферы и океана. 2002. Т. 15. № 5-6. С. 435-440.

*Виноградова А.А., Шевченко В.П., Пономарева Т.Я., Клювиткин А.А.* Тренды 15-летних изменений в процессах переноса воздушных масс и антропогенных аэрозольных примесей в район моря Лаптевых // Оптика атмосферы и океана. 2003. Т. 16. № 5-6. С. 426-431.

Геоэкология шельфа и берегов морей России / Под ред. Н.А. Айбулатова. М.: Ноосфера, 2001. 428 с.

*Гецен М.В.* Водоросли в экосистемах Крайнего Севера. Л.: Наука, 1985. 165 с.

*Голубева Н.И., Матишов Г.Г., Бурцева Л.В.* Результаты исследования загрязнения тяжелыми металлами атмосферного воздуха в открытых районах Баренцева и Белого морей // ДАН. 2002. Т. 387. № 4. С. 537-540.

*Голубева Н.И., Матишов Г.Г., Бурцева Л.В.* Атмосферные потоки тяжелых металлов в Баренцево море в секторе Кольского полуострова // Фундаментальные исследования океанов и морей. М.: Наука, 2006. Кн. 2. С. 465-475.

*Гордеев В.В.* Реки Российской Арктики: потоки осадочного материала с континента в океан // Новые идеи в океанологии. М.: Наука, 2004. Т. 2. С. 113-167.

*Добровольский В.В.* Основы биогеохимии. М.: Высшая школа, 1998. 413 с.

*Добровольский В.В.* География почв с основами почвоведения. М.: ВЛАДОС, 1999. 384 с.

Ежегодник состояния загрязнения воздуха и выбросов вредных веществ в атмосферу городов и промышленных центров Советского Союза. Л., 1990.

Ежегодник выбросов загрязняющих веществ в атмосферу городов и регионов Российской Федерации (России) 1997 г. СПб., 1998. 433 с.

*Иванов Г.И.* Методология и результаты экогеохимических исследований Баренцева моря. СПб.: ВНИИОкеангеология, 2002. 153 с.

*Израэль Ю.А., Павлов А.В., Анохин Ю.А.* Эволюция криолитозоны при современных изменениях глобального климата // Метеорология и гидрология. 2002. № 1. С. 22-34.

*Исаченко А.Г., Шляпников А.А.* Ландшафты. М.: Мысль, 1989. 504 с.

*Казарина Г.Х., Серова В.В.* Диатомеи в золотой взвеси над Атлантическим океаном // Современный и ископаемый микропланктон Мирового океана / Под ред. М.С. Бараша М.: Наука, 1995. С. 100-107.

- Колесов Г.М.* Определение микроэлементов. Нейтронно-активационный анализ в геохимии и космохимии // Журнал аналитической химии. 1994. Т. 49. № 1. С. 160-171.
- Кондратьев К.Я.* Атмосферный аэрозоль как климатообразующий компонент атмосферы. 1. Свойства аэрозоля различных типов // Оптика атмосферы и океана. 2004. Т. 17. № 1. С. 5-24.
- Куценогий К.П., Ковальская Г.А., Смирнова А.И. и др.* Рентгенофлуоресцентный метод с использованием синхротронного излучения для многоэлементного анализа состава аэрозолей // Оптика атмосферы и океана. 1997. Т. 10. № 7. С. 820-827.
- Куценогий К.П., Шевченко В.П., Лисицын А.П. и др.* Химический состав атмосферных аэрозолей в районе Белого моря // Геология морей и океанов: Тез. докл. XVI Междунар. научной школы по морской геологии (Москва, 14-18 ноября 2005 г.). М.: ГЕОС, 2005. Т. I. С. 75-76.
- Лисицын А.П.* Процессы океанской седиментации. Литология и геохимия. М.: Наука, 1978. 392 с.
- Лисицын А.П.* Процессы терригенной седиментации в морях и океанах. М.: Наука, 1991. 271 с.
- Лисицын А.П.* [Маргинальный фильтр океанов](#) // Океанология. 1994а. Т. 34. № 5. С. 735-743.
- Лисицын А.П.* Ледовая седиментация в Мировом океане. М.: Наука, 1994б. 448 с.
- Лисицын А.П.* Осадочные процессы и минеральные ресурсы материковых склонов Мирового океана // Актуальные проблемы океанологии. М.: Наука, 2004а. С. 82-152.
- Лисицын А.П.* Потоки осадочного вещества, природные фильтры и осадочные системы «живого океана» // Геология и геофизика. 2004б. Т. 45. № 1. С. 15-48.
- Лисицын А.П., Горбунова З.Н.* Глинистые минералы и климатическая зональность // Климатическая зональность и осадкообразование / Под ред. А.П. Лисицына, Д.Е. Гершановича. М.: Наука, 1981. С. 160-171.
- Матишов Г.Г., Голубева Н.И.* Химические примеси в снежном покрове Печорского и Карского морей // Биология и океанография Карского и Баренцева морей (по трассе Севморпути) / Отв. ред. Г.Г. Матишов. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 1998. С. 430-440.
- Нагурный А.П., Мариунова М.С., Макитас А.П.* Исследование приледного аэрозоля и интегральной прозрачности атмосферы // Результаты первой научной экспедиции в приполюсном районе на атомном ледоколе «Сибирь» / Под ред. А.Н. Чилингарова, Б.А. Крутских. Л.: Гидрометеиздат, 1990. С. 77-82.
- Немировская И.А.* Углеводороды в снежно-ледяном покрове Центральной Арктики // Докл. РАН. 2002. Т. 382. № 6. С. 802-806.
- Полькин В.В., Голобокова Л.П., Козлов В.С. и др.* Оценка связи микрофизического и химического состава для приводного аэрозоля Белого моря // Оптика атмосферы и океана. 2004. Т. 17. №5-6. С. 377-385.
- Полякова Е.И.* Арктические моря Евразии в позднем кайнозое М.: Научный мир, 1997. 145 с.
- Радионов В.Ф., Брызгин Н.Н., Александров Е.И.* Снежный покров в Арктическом бассейне. СПб.: Гидрометеиздат, 1996. 124 с.
- Ровинский Ф.Я., Громов С.А., Бурцева Л.В., Парамонов С.Г.* Тяжелые металлы: дальний перенос в атмосфере и выпадение с осадками // Метеорология и гидрология. 1994. № 10. С. 5-14.
- Ровинский Ф.Я., Черногаева Г.М., Парамонов С.Г.* Роль речного стока и атмосферного переноса в загрязнении российских северных морей // Метеорология и гидрология. 1995. № 9. С. 22-29.
- Северный Ледовитый и Южный океаны. География Мирового океана / Под ред. А.Ф. Трешникова и С.С. Сальникова. Л.: Наука, 1985. 501 с.
- Серова В.В., Горбунова З.Н.* Минеральный состав почв, аэрозолей, взвешенного вещества и донных осадков устьевой части реки Лены и моря Лаптевых // Океанология. 1997. Т. 37. №1. С. 131-135.

- Смирнов В.В., Шевченко В.П.* Дымки и туманы полярных морей // Метеорология и гидрология. 2003. № 1. С. 49-57.
- Смирнов В.В., Радионов В.Ф., Пронин А.А. и др.* Изменчивость аэрозольного и ионного состава приземной арктической атмосферы в весенний период // Тр. Института экспериментальной метеорологии. Вып. 26 (161). СПб.: Гидрометеоиздат, 1996. С. 50-68.
- Формирование и динамика современного климата Арктики.* СПб.: Гидрометеоиздат, 2004. 254 с.
- Шевченко В.П.* Влияние аэрозолей на среду и морское осадконакопление в Арктике. М.: Наука, 2006. 226 с.
- Шевченко В.П., Ван-Гракен Р., Ван-Малдерен Г. и др.* Состав аэрозольных частиц в приводном слое атмосферы над морями западного сектора Российской Арктики // Докл. РАН. 1999. Т. 366. № 2. С. 242-247.
- Шевченко В.П., Виноградова А.А., Иванов Г.И., Серова В.В.* Состав морского аэрозоля в западной части Северного Ледовитого океана // Изв. АН. Физика атмосферы и океана. 1998. Т. 34. № 5. С. 664-668.
- Шевченко В.П., Иванов Г.И., Буровкин А.А. и др.* Потоки осадочного материала в проливе Святой Анны и восточной части Баренцева моря // Докл. РАН. 1998. Т. 359А. С. 400-403.
- Шевченко В.П., Лисицын А.П., Виноградова А.А. и др.* Аэрозоли Арктики - результаты десятилетних исследований // Оптика атмосферы и океана. 2000. Т. 13. № 6/7. С. 551-576.
- Шевченко В.П., Лисицын А.П., Виноградова А.А. и др.* Аэрозоли Арктики и их влияние на окружающую среду // Аэрозоли Сибири / Отв. ред. К.П. Куценогий. М.: Изд-во СО РАН. 2006. С. 148-184.
- Шевченко В.П., Лисицын А.П., Виноградова А.А. и др.* Новый взгляд на влияние эолового переноса на современное морское осадконакопление и окружающую среду в Арктике - результаты исследования аэрозолей и снежного покрова // Новые идеи в океанологии / Под ред. М.Е. Виноградова, С.С. Лаппо. Т. 2. М.: Наука, 2004. С. 168-214.
- Шевченко В.П., Лисицын А.П., Полякова Е.И. и др.* Распределение и состав осадочного материала в снежном покрове дрейфующих льдов Арктики (пролив Фрама) // Докл. РАН. 2002. Т. 383. № 3. С. 385-389.
- Шевченко В.П., Лисицын А.П., Штайн Р. и др.* Распределение и состав нерастворимых частиц в снеге Арктики // Проблемы Арктики и Антарктики. СПб.: ААНИИ, 2007а. №75. С. 106-118.
- Шевченко В.П., Филиппов А.С., Богунов А.Ю. и др.* Геохимические исследования взвеси в маргинальном фильтре реки Северная Двина в конце зимнего периода // Вестн. АГТУ. Архангельск: АГТУ, 2007б. № 70. С. 164-176.
- Akeredolu F.A., Barrie L.A., Olson M.P. et al.* The flux of anthropogenic trace metals into the Arctic from the mid-latitudes in 1979/80 // Atmos. Environ. 1994. Vol. 28. P. 1557-1572.
- Arctic Pollution Issues: A State of the Arctic Environment Report. Oslo: AMAP (Arctic Monitoring and Assessment Programme). 1997. 188 p.
- Barrie L.A., Barrie M.J.* [Chemical components of lower tropospheric aerosols in the high Arctic: Six years of observation](#) // J. Atmos. Chem. 1990. Vol. 11. P. 211-226.
- Berg T., Hjellbrekke A.-G., Skjelmoen J.E.* Heavy metals and POPs within the ECE region // EMEP / CCC-Report 8/96. O-95038. NILU, Norway, 1996. 187p.
- Bigg K.E., Leek C.* [Properties of the aerosol over the central Arctic Ocean](#) // J. Geophys. Res. 2001. Vol. 106. ND23. P. 32101-32109.
- Brimblecombe P.* Air Composition and Chemistry. Cambridge University Press, 1996. 253 p.
- Burckle L.H., Gayley R.I., Ram M., Petit J.-R.* [Diatoms in Antarctic ice cores: some implications for the glacial history of Antarctica](#) // Geology. 1988. Vol. 16. P. 326-329.
- Chester R.* Marine Geochemistry. London: Unwin Hyman, 1990. 466 p.



- Darby D.A., Burckle L.H., Clark D.L.* [Airborne dust on the Arctic pack ice: its composition and fallout rate](#) // Earth Planet. Sci. Lett. 1974. Vol. 24. P. 166-172.
- Darby D.A., Naidu A.S., Mowatt T.C., Jones G.* [Sediment composition and sedimentary processes in the Arctic Ocean](#) // The Arctic Seas - Climatology, Oceanography, Geology and Biology / Y. Herman (Ed.). N. Y., 1989. P. 657-720.
- Draxler R.R., Rolph G.D.* HYSPLIT (HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) Model access via NOAAARL READY Website. 2003. (<http://www.arl.noaa.gov/ready/hysplit4.html>)
- Duce R.A., Hoffman G.L., Ray B.J. et al.* Trace metals in the marine atmosphere: sources and fluxes // Marine Pollutant Transfer / H.L. Windom, R.A. Duce (eds.). Toronto: Lexington Books, 1976. P. 77-119.
- Eicken H., Reimnitz E., Alexandrov V. et al.* [Sea-ice processes in the Laptev Sea and their importance for sediment export](#) // Continental Shelf Research. 1997. Vol. 17. P. 205-233.
- Gordeev V.V., Martin J.M., Sidorov I.S., Sidorova M.V.* [A reassessment of the Eurasian river input of water, sediment, major elements, and nutrients to the Arctic Ocean](#) // American Journal of Science. 1996. Vol. 296. P. 664-691.
- Heintzenberg J., Hansson H.C., Lannefors H.* [The chemical composition of Arctic haze at Ny-Ålesund, Spitsbergen](#) // Tellus. 1981. Vol. 33B. P. 162-171.
- Kienel U.* [Late Weichselian to Holocene diatom succession in a sediment core from Lama Lake, Siberia and presumed ecological implications](#) // Land-ocean systems in the Siberian Arctic: dynamics and history / Eds. H. Kassens et al. Berlin: Springer, 1999. P. 377-406.
- Kikuchi K., Taniguchi T., Uyeda H.* [Characteristics of the concentration and composition of aerosol during Foehn in West Greenland](#) // Tellus. 1996. Vol. 48B. P. 372-386.
- Kim G., Hussain N., Church T.M.* [Excess <sup>210</sup>Po in the coastal atmosphere](#) // Tellus. 2000. Vol. 52B. P. 74-80.
- Koutzenogii K.P., Shevchenko V.P., Lisitzin A.P. et al.* The chemical composition of atmospheric aerosols at the Kartesh biostation (the White Sea) // Seventh Workshop on Land Ocean Interactions in the Russian Arctic, LOIRA project (Moscow, November 15-18, 2004). Abstracts. 2004. P. 65-66.
- Kriews M., Schrems O.* Pollution analysis in the Arctic: Determination of heavy metals in deposition samples from Spitsbergen // Proceeding of International Conference «Heavy Metals in the Environment». Hamburg, September 1995. Edinburg: CEP Consultants, 1995. P. 371-374.
- Larsen J.* [Size distributions and concentrations of spheroidal carbonaceous fly-ash particles \(SCPs\) in lake sediments as an aid to detecting locally deposited atmospheric pollution](#) // Water, Air, and Soil Pollution. 2003. Vol. 149. P. 163-175.
- Leek C., Norman M., Bigg E.K., Hillamo R.* [Chemical composition and sources of the high Arctic aerosol relevant for cloud formation](#) // J. Geophys. Res. D. 2001. Vol. 107. N 12.
- Lisitzin A.P.* [Oceanic Sedimentation. Lithology and Geochemistry](#). Washington D.C.: American Geophysical Union, 1996. 390 p.
- Lisitzin A.P.* [Sea-ice and Iceberg Sedimentation in the Ocean: Recent and Past](#). Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2002. 563 p.
- Maenhaut W., Cornille P., Pacyna J.M., Vitols V.* [Trace element composition and origin of the atmospheric aerosol in the Norwegian Arctic](#) // Atmos. Environ. 1989. Vol. 23. N 11. P. 2551-2569.
- Makarov V.I., Koutsenogii K.P., Koutsenogii P.K.* Daily and seasonal changes organic and inorganic carbon content in atmospheric aerosol Novosibirsk region // J. Aerosol Sci. 1999. Vol. 30. P. 659-660.
- Mart L.* [Seasonal variations of Cd, Pb, Cu and Ni levels in snow from the eastern Arctic Ocean](#) // Tellus. 1983. Vol. 35B. P. 131-141.
- Matthiessen J.* Distribution of palynomorphs in surface sediments from the Ob and Yenisei estuaries (Kara Sea, Arctic Ocean) // Berichte zur Polarforschung. 1999. № 300. P. 222-235.

*Naidina O.D., Bauch H.A.* [Distribution of pollen and spores in surface sediments of the Laptev Sea](#) // Land-ocean systems in the Siberian Arctic: dynamics and history / Eds. H. Kassens et al. Berlin: Springer, 1999. P. 577-585.

*Novakov T., Cachier H., Clark J.S. et al.* [Characterization of particulate products of biomass combustion](#) // Sediment Records of Biomass Burning and Global Change. NATO ASI Series. Vol. 151/ Eds. J.S. Clark, H. Cachier, J.G. Goldammer, B. Stocks. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 1997. P. 117-143.

*O'Dowd C.D., Smith M.H.* [Physicochemical properties of aerosols over the Northeast Atlantic: Evidence for wind-speed-related submicron sea-salt aerosol production](#) // J. Geophys. Res. 1993. Vol. 98. ND1. P. 1137-1149.

*Pacyna J.M., Semb A., Hanssen J.E.* [Emission and long-range transport of trace elements in Europe](#) // Tellus. 1984. Vol. 36B. N 3. P. 163-178.

*Pacyna J.M., Ottar B., Tomza U., Maenhaut W.* [Long-range transport of trace elements to Ny-Alesund, Spitsbergen](#) // Atmos. Environ. 1985. Vol. 19. N6. P. 857-864.

*Pfirman S., Wollenburg I., Thiede J., Lange M.* [Lithogenic sediment on Arctic pack ice: Potential aeolian flux and contribution to deep sea sediments](#) // Paleoclimatology and Paleometeorology: Modern and Past Patterns of Global Atmospheric Transport. Kluwer Academic Publishers, 1989. P. 463-493.

*Polissar A.V., Hopke P.K., Malm W.C., Sisler J.F.* [Atmospheric aerosol over Alaska. 1. Spatial and seasonal variability](#) // J. Geophys. Res. 1998. Vol. 103. ND15. P. 19035-19044.

*Quinn P.K., Miller T.L., Bates T.S. et al.* [A 3-year record of simultaneously measured aerosol chemical and optical properties at Barrow, Alaska](#) // J. Geophys. Res. 2002. Vol. 107. № D11.10.1029/2001JD001248.

*Rachold V., Eicken H., Gordeev V.V. et al.* [Modern terrigenous organic carbon input to the Arctic Ocean](#) // The Organic Carbon Cycle in the Arctic Ocean / Eds. R. Stein., R.W. Macdonald. Berlin; Heidelberg: Springer, 2003. P. 33-56.

*Rahn K.A.* [Atmospheric, riverine and oceanic sources of seven trace constituents to the Arctic ocean](#) // Atmos. Environ. 1981. Vol. 15. № 8. P. 1507-1516.

*Rahn K.A., Lewis N.F., Lowenthal D.H., Smith D.I.* [Noril'sk only a minor contributor to Arctic haze](#) // Nature. 1983. Vol. 306. № 5942. P. 459-461.

*Rose N.L.* [Carbonaceous particle record in lake sediments from the Arctic and other remote areas of the Northern Hemisphere](#) // Sci. Total Environ. 1995. Vol. 160/161. P. 487-496.

*Rose N.L., Rose C.L., Boyle J.F., Appleby P.G.* [Lake-sediment evidence for local and remote sources of atmospherically deposited pollutants on Svalbard](#) // J. of Paleolimnology. 2004. Vol. 31. P. 499-513.

*Sirois A., Barrie L.A.* [Arctic lower tropospheric aerosol trends and composition at Alert, Canada: 1980-1995](#) // J. Geophys. Res. 1999. Vol. 104. № D9. P. 11599-11618.

*Sheridan P.J., Musselman I.H.* [Characterization of aircraft-collected particles present in the Arctic aerosol; Alaskan Arctic, spring 1983](#) // Atmos. Environ. 1985. Vol. 19. P. 2159-2166.

*Shevchenko V.* The influence of aerosols on the oceanic sedimentation and environmental conditions in the Arctic // Berichte zur Polar- und Meeresforschung. 2003. № 464. 149 S.

*Shevchenko V.P., Lisitzin A.P.* Aeolian input // The Arctic Ocean Organic Carbon Cycle: Present and Past / Eds. R. Stein, R.W. Macdonald. Berlin; Heidelberg; N.Y.: Springer, 2003. P. 53-54.

*Shevchenko V.P., Lisitzin A.P., Kuptzov V.M. et al.* Composition of aerosols over the Laptev, Kara, Barents, Greenland and Norwegian seas // Berichte zur Polarforschung. 1995. № 176. S. 7-16.

*Smirnov V.V., Shevchenko V.P., Stein R. et al.* Aerosol size distribution over the Laptev Sea in July-September 1995: First results // Berichte zur Polarforschung. 1996. №212. S. 139-143.

*Smith W.O., Jr.* Phytoplankton dynamics in marginal ice zones // Oceanography and Marine Biology. An Annual Review. 1987. Vol. 25. P. 11-38.

Taylor S.R. [The abundance of chemical elements in the continental crust - a new table](#) // Geochim. Cosmochim. Acta. 1964. Vol. 28. P. 1273-1285.

Ugolini F.C. Processes and rates of weathering in cold and polar desert environment // Rates of Chemical Weathering of Rocks and Minerals / Eds. S.M. Coleman and D.P. Dethier. London: Academic Press, 1986. P. 193-235.

Vinogradova A.A. [Anthropogenic pollutants in the Russian Arctic atmosphere: sources and sinks in spring and summer](#) // Atmos. Environ. 2000. Vol. 34. P. 5151-5160.

Walker T.R., Young S.D., Crittenden P.D., Zhang H. [Anthropogenic metal enrichment of snow and soil in north-eastern European Russia](#) // Environ. Pollution. 2003. Vol. 121. P. 11 -21.

Wedepohl K.H. Composition and abundance of common igneous rocks // Handbook of Geochemistry / Ed. K. Wedepohl. Berlin; N.Y.: Springer-Verlag, 1969. P. 37-53.

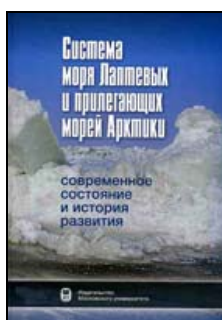
Yli-Tuomi T., Venditte L., Hopke P.K. et al. [Composition of the Finnish Arctic aerosol: collection and analysis of historic filter samples](#) // Atmos. Environ. 2003. Vol. 37. P. 2355-2364.

#### **1.4. Atmospheric aerosols as the source of the sedimentary matter and pollution in the Arctic Ocean** **V.P. Shevchenko<sup>1</sup>, A.A. Vinogradova<sup>2</sup>, A.P. Lisitzin<sup>1</sup>, A.N. Novigatsky<sup>1</sup>, N.V. Goryunova<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> P.P. Shirshov Institute of Oceanology, RAS, Moscow, Russia. <sup>2</sup> A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics, RAS (IAP RAS), Moscow, Russia

Results of atmospheric aerosols and insoluble particles in snow in different areas of the Arctic author's studies in 1994-2007 and literature have been summarized. Grain size, mineral and elemental composition of particles were studied, anthropogenic and natural constituents and their remote sources have been revealed. It has been shown, that background concentration of insoluble particles >0.45 urn in the Arctic snow varies from 0.2 to 3 mg/1, that is considerably higher than suspended matter concentration in under-ice water. Sedimentary matter in fresh snow is represented mainly by mineral and biogenic particles (spores, pollens, fibers, diatoms) of pelitic and silty size; soot and anthropogenic combustion spheres are less abundant. Study of lithology and geochemistry of snow cover (natural collector of both dissolved and particulate aeolian matter) helps to reveal new aspects of interaction of aerosols with different natural objects in the Arctic. Arctic aerosols exert secondary influence on the Arctic environment via snow and ice (depositing spheres), that increases the importance of aeolian transport of matter for Arctic ecosystems. Balance estimations show that input of aerosols to the Arctic sedimentary matter beyond the marginal filters of rivers is close to the riverine discharge input. In general, the input of aerosols to Arctic sedimentation is about 10%.

#### **Ссылка на статью:**



Шевченко В.П., Виноградова А.А., Лисицын А.П., Новигатский А.Н., Горюнова Н.В. **Атмосферные аэрозоли как источник осадочного вещества и загрязнений в Северном Ледовитом океане.** В кн.: «Система моря Лаптевых и прилегающих морей Арктики: современное состояние и история развития». М.: Изд-во Моск. ун-та, 2009, с. 150-172.