

В.П.ШЕВЧЕНКО¹, А.П.ЛИСИЦЫН¹, Р.ШТАЙН (R.STEIN)², Н.В.ГОРЮНОВА¹,
А.А.КЛЮВИТКИН¹, М.Д.КРАВЧИШИНА¹, М.КРИВС (M.KRIEWS)²,
А.Н.НОВИГАТСКИЙ¹, В.Т.СОКОЛОВ³, А.С.ФИЛИППОВ¹, Х.ХААС (С.НААС)²

¹ – Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва, Россия

² – Институт полярных и морских исследований им. А.Вегенера, г. Бремерхафен, Германия

³ – ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ И СОСТАВ НЕРАСТВОРИМЫХ ЧАСТИЦ В СНЕГЕ АРКТИКИ

Обобщены результаты исследований распределения и состава нерастворимых частиц в снеге Арктики, выполненных авторами в 1994–2005 гг., и литературные данные. Показано, что фоновое содержание нерастворимых частиц размером $>0,45$ мкм в снеге Арктики, по нашим данным, 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. В большинстве проб в незначительном количестве обнаружены сажа, гладкие сферы сгорания диаметром 0,5–5 мкм, поступающие в атмосферу с выбросами металлургических, горнодобывающих комбинатов, тепловых электростанций, ТЭЦ. Балансные подсчеты, полученные на основе наших определений, показывают, что вклад аэрозолей в формирование осадочного материала в Арктике близок к вкладу речного осадочного вещества – за пределами маргинальных фильтров рек. В целом для Северного Ледовитого океана (пелагиаль) вклад аэрозолей в осадкообразование составляет примерно 10 %.

ВВЕДЕНИЕ

Снежный покров обладает рядом свойств, делающих его удобным индикатором состояния экосистемы [2, 3, 15, 40]. Снег вымывает из атмосферы твердые (аэрозоли) и растворенные вещества (влаги и все виды загрязнений). 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. Осадочное вещество снега характеризует зимнюю атмосферу, когда окружающая суша покрыта слоем снега, а реки и моря – льдом, т.е. поступление аэрозольного минерального вещества и солей из водосбора и с поверхности моря отсутствует или минимально, главное значение поэтому приобретает вещество дальнего (тысячи км) и сверхдальнего переноса (>10 тыс. км) [10, 11, 40]. В Арктике при отборе всей толщи накопившегося снега (с первого снегопада и до времени отбора) с поверхности льда можно определить скорость его накопления на единицу поверхности, т.е. поток аэрозольного и растворенного эолового материала, и таким образом получить надежную количественную и качественную характеристику поступления эолового материала на поверхность моря [11, 31, 40]. Снег на

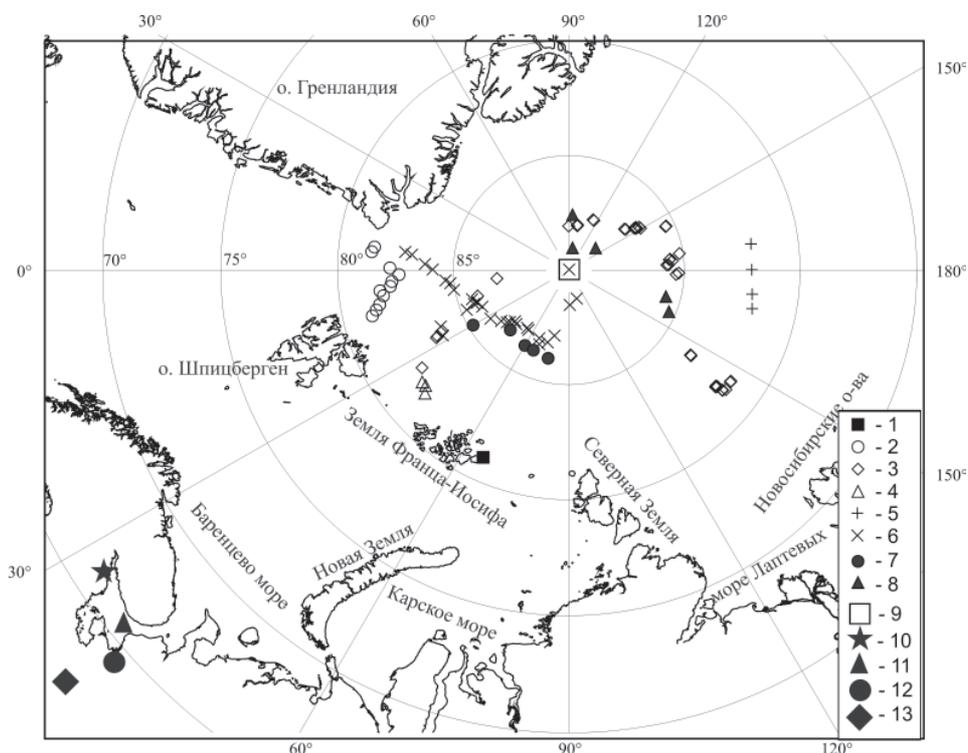


Рис. 1. Пробы снега: 1 – 9-й рейс НИС «Профессор Логачев» (август 1994 г.); 2 – ARK-XIII/2 рейс НИС «Polarstern» (июль–август 1997 г.); 3 – ARK-XIV/1a рейс НИС «Polarstern» (июль 1998 г.); 4 – 14-й рейс НЭС «Академик Федоров» (сентябрь–октябрь 1998 г.); 5 – 17-й рейс НЭС «Академик Федоров» (сентябрь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

поверхности льдов в море – это гигантская ловушка аэрозольного и растворенного вещества для зимнего сезона (в Арктике основного по продолжительности).

Первые исследования твердых частиц в снеге с поверхности дрейфующих льдов Арктики были выполнены в Американо-русском бассейне [29, 43]. Позже такие работы были продолжены в области Трансполярного дрейфа в экспедициях немецкого НИС ледового класса «Поларштерн» [47]. В данной статье нами представлены результаты исследований авторов и литературные данные.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Детальные исследования состава снежного покрова в проливе Фрама и в районе подводного плато Ермак были проведены нами в июле 1997 г. в рейсе ARK-XIII/2 НИС «Поларштерн» [23]. В период с 1998 по 2005 г. исследования нерастворимых частиц в снеге были проведены в экспедициях на НИС «Поларштерн», НЭС «Академик Федоров», ГС «Сергей Кравков», на российских дрейфующих станциях «Северный полюс», на припайном льду губы Чула (Кандалакшский

залив Белого моря), в устьевой зоне р. Северная Двина, на Белом море. Положение мест отбора проб показано на рис. 1. Во время рейсов НИС «Полярштерн» научные сотрудники, отбирающие пробы, доставлялись на дрейфующие льдины на расстоянии не менее 2 км от судна в направлении против ветра. Отбор снега проводился на расстоянии не менее 100 м против ветра от вертолета чистыми пластмассовыми совками в тefлоновые пакеты. Сразу после доставки на борт НИС «Полярштерн» пробы помещали в холодильник и хранили при температуре $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ до обработки. Аналогичные меры предотвращения загрязнения снега во время пробоотбора предпринимались и в других экспедициях.

После отбора снег был растоплен при комнатной температуре и полученная вода профильтрована через предварительно взвешенные ядерные фильтры диаметром 47 мм, диаметр пор 0,45 мкм. Параллельно часть талой воды фильтровали через стекловолнистые фильтры GF/F (Whatman).

Сканирующая электронная микроскопия выполнялась авторами в Институте им. П.П.Ширшова РАН, Москва на микроскопе JSM-U3 (Jeol, Japan) и в Институте полярных и морских исследований им. А.Вегенера, Бремерхафен, Германия на микроскопе XL 30 ESEM (Philips, USA). Содержание органического углерода и азота было определено в Институте полярных и морских исследований им. А.Вегенера, Бремерхафен, Германия на приборе Carlo Erba-1500 после обработки фильтров GF/F с взвесью раствором соляной кислоты для удаления карбонатов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

По степени влияния антропогенных аэрозолей на формирование состава снежного покрова выделяют районы импактные (в значительной мере подверженные поступлению эолового материала из близко расположенных промышленных центров) и фоновые (относительно удаленные от антропогенных источников).

Импактные районы

Норильский регион. Атмосферные промышленные выбросы являются основным источником загрязнения природной среды Норильского промышленного района. Зона наивысшего загрязнения снега располагается в пределах 2–3 км от источника и зависит от высоты выбросов из труб металлургического завода [7]. На расстоянии 2 км от медеплавильного завода концентрация нерастворимых частиц в снеге составляла 2925 мг/л и по мере удаления от источника резко уменьшалась, хотя и на расстоянии 16 км оставалась очень высокой (175 мг/л), значительно превышая фоновые значения (табл. 1). Химический состав твердого осадка характеризуется высоким содержанием таких тяжелых металлов, как железо, медь, никель, марганец, хром, цинк, свинец, кадмий. По мере удаления от источника выбросов в твердом осадке снеговой воды быстро убывает содержание Cr, Mn, Fe, Ni и Cu, незначительно снижается содержание Zn и возрастает содержание Cd и Pb. При весеннем снеготаянии накопленные за зиму массы загрязнений попадают в почвы, поверхностные и грунтовые воды, а затем в донные отложения водоемов [6, 7].

Промышленные районы северо-востока Европейской части России. Для промышленности северо-востока Европейской части России основное значение имеет добыча угля, нефти, газа. Главный центр угледобывающей промышленности – район Воркуты. Переработка нефти и газа производится на Ухтинском нефтеперерабатывающем заводе, газа – в г. Сосногорске. Аэрозольные выпадения в зимний период четко фиксируются снежным покровом, сохраняющимся в данном регионе в течение примерно 8 месяцев.

Исследование снежного покрова на разрезах, проходящих через г. Воркута, Инта и Усинск, в марте–апреле 1998 и 1999 гг. [61, 62] показало, что концентрация нерастворимых частиц в городах Инта, Воркута и Усинск составляет в среднем 46, 37 и 13 мг/л, соответственно. На удалении более 30 км от Инты и Воркуты

Таблица 1

Концентрация нерастворимых частиц в снежном покрове Арктики

Район	Время	Кол-во проб	Концентрация, мг/л	Источник
<i>Импактные районы</i>				
Норильск, 2 км к СВ от МПЗ НГМК*			2925	[7]
Норильск, 16 км к СВ от МПЗ НГМК			175	[7]
г. Архангельск, лед р. Северная Двина	Март 2004 г.	3	$\frac{1,14-3,80}{2,45}$ **	[20]
г. Архангельск и его окрестности	Март 2005 г.	20	$\frac{2,73-22,7}{9,54}$	[21]
г. Архангельск, 1 км от ТЭЦ	Март 2005 г.	1	76,7	[21]
г. Лулео, Швеция, спальные районы	Январь–апрель 1995 г.		19 (среднее значение)	[60]
<i>Фоновые районы</i>				
Амеразийский бассейн, дрейфующая станция Т-3	Март 1970 г.	4	$\frac{0,67-1,63}{1,04}$	[43]
Амеразийский бассейн, дрейфующая станция AIDJEX	Апрель 1972 г.	22	$\frac{0,16-1,47}{0,36}$	[29]
Желоб Святой Анны	Август 1994 г.	1	0,50	[22]
Пролив Фрама	Июль 1997 г.	11	$\frac{1,03-12,91}{2,74}$	[23]
Центральная Арктика	Июль 1998 г.	32	$\frac{0,43-16,37}{2,91}$	Данная работа
Желоб Франц-Виктория	Сентябрь 1998 г.	3	$\frac{2,6-4,3}{3,2}$	[16]
Губа Чупа, Белое море	Март 2001 г.	4	$\frac{0,5-1,6}{0,78}$	[58]
	Апрель 2002 г.	3	$\frac{0,40-3,10}{1,91}$	[22]
	Март–апрель 2004 г.	16	$\frac{0,33-2,63}{0,84}$	[56]
Район Северного полюса, Российская дрейфующая станция	Апрель 2001 г.	4	$\frac{1,25-2,00}{1,51}$	[22]
	Апрель 2002 г.	2	$\frac{0,22-0,50}{0,36}$	[22]
	Сентябрь 2003 г. – февраль 2004 г. (СП-32)	7	$\frac{0,18-0,69}{0,37}$	Данная работа
	Октябрь 2004 г. – май 2005 г. (СП-33)	5	$\frac{0,10-0,17}{0,13}$	Данная работа
Кенозерский национальный парк, Архангельская область	Январь 2001–2004 гг.	5	$\frac{1,00-2,00}{1,46}$	[19]
Горло Белого моря	Апрель 2003 г.	2	$\frac{1,58-3,07}{2,33}$	[9]

Примечание. * – МПЗ НГМК – Медеплавильный завод Норильского горно-металлургического комбината, ** – в числителе минимальное и максимальные значения, в знаменателе – среднее.

концентрация взвеси в снежном покрове снижается в несколько раз и выходит на фоновый уровень, тогда как в Усинске она находится на фоновом уровне. Связано это с тем, что основным компонентом взвеси в снеге Инты и Воркуты является пепел (зола), образующийся при сжигании угля на местных ТЭЦ. Важным компонентом взвеси в Воркуте является также цементная пыль, выбрасываемая в воздух местным цементным заводом. В Усинске в качестве топлива на ТЭЦ используется природный газ, что резко снижает загрязнение окружающей среды.

Район Архангельска. Распределение нерастворимых частиц в снежном покрове на льду в устьевой зоне р. Северная Двина было изучено нами в период с 19 по 27 марта 2005 г. [21]. Исследования охватывали район от г. Новодвинска до о-ва Мудьюгский в Двинском заливе Белого моря. Концентрация нерастворимых частиц в снежном покрове на льду реки на большинстве станций варьировала от 2,73 до 22,7 мг/л, составляя в среднем 9,54 мг/л. Наиболее низкие концентрации частиц (от 2,73 до 4,07 мг/л) зарегистрированы в снеге районов, находящихся вдали от антропогенных источников. Эти значения, однако, в несколько раз превышают фоновые для снежного покрова Арктики значения (2,19 мг/л) [22]), но близки к данным для городов со средней степенью загрязнения атмосферы [3, 60]. Аномально высокое содержание нерастворимых частиц в снеге было обнаружено в устье р. Юрас около ТЭЦ (76,7 мг/л). Такое пространственное распределение эоловой взвеси в снежном покрове Архангельской агломерации и прилегающих к ней территорий хорошо качественно согласуется с оценками аэротехногенного загрязнения окружающей среды рассматриваемого региона [17, 24].

Кольский полуостров. Большая часть территории Кольского полуострова расположена за полярным кругом, что обуславливает наличие снежного покрова в течение 180–220 дней в году [18]. На фоновый (природный) уровень концентраций вещества в снежном покрове накладываются выбросы промышленных и городских агломераций как Кольского полуострова, так и более отдаленных районов. В снежном покрове наблюдаются значительная изменчивость в содержании нерастворимых частиц и тяжелых металлов. Наиболее загрязнен снежный покров в окрестностях центров цветной металлургии и переработки апатито-нефелинового сырья и крупных городов [1, 6, 28]. Проведенные исследования показали, что снежный покров Кольского полуострова испытывает повышенные антропогенные нагрузки, в нем накапливаются и перераспределяются токсичные химические соединения и элементы, впоследствии влияющие и на другие геосистемы полуострова.

Фоновые районы

Содержание частиц в поверхностном слое снежного покрова на дрейфующих льдинах в Арктике (пролив Фрама и район подводного плато Ермак) в июле 1997 г. составляло от 1,03 до 12,91 мг/л, в среднем 2,74 мг/л ($n = 11$ проб) [23]. В июле 1998 г. во время ARK-XIV/1a рейса НИС «Полярштерн» содержание частиц в снеге на льдинах высокоширотной Арктики было от 0,43 до 16,37 мг/л, составляя в среднем 2,91 мг/л ($n = 32$ пробы). В районе от 85° с.ш. до полюса в сентябре 2003 г. – феврале 2004 г. во время дрейфа СП-32 содержание взвеси составляло от 0,18 до 0,69 мг/л (в среднем 0,37 мг/л, $n = 7$ проб), а в октябре 2004 г. – мае 2005 г. во время дрейфа СП-33 – от 0,10 до 0,17 мг/л (в среднем 0,13 мг/л, $n = 5$ проб). Все эти значения намного выше, чем концентрации взвеси в морской воде (<0,2 мг/л) [10, 13].

По результатам оптической и сканирующей электронной микроскопии основная часть материала на фильтрах имеет тонкопелитовую (<1 мкм) и пелитовую (от 1 до 10 мкм) размерность, сравнительно редко встречаются частицы алевритовой размерности (от 10 до 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, споры и диатомовые водоросли). Наиболее харак-

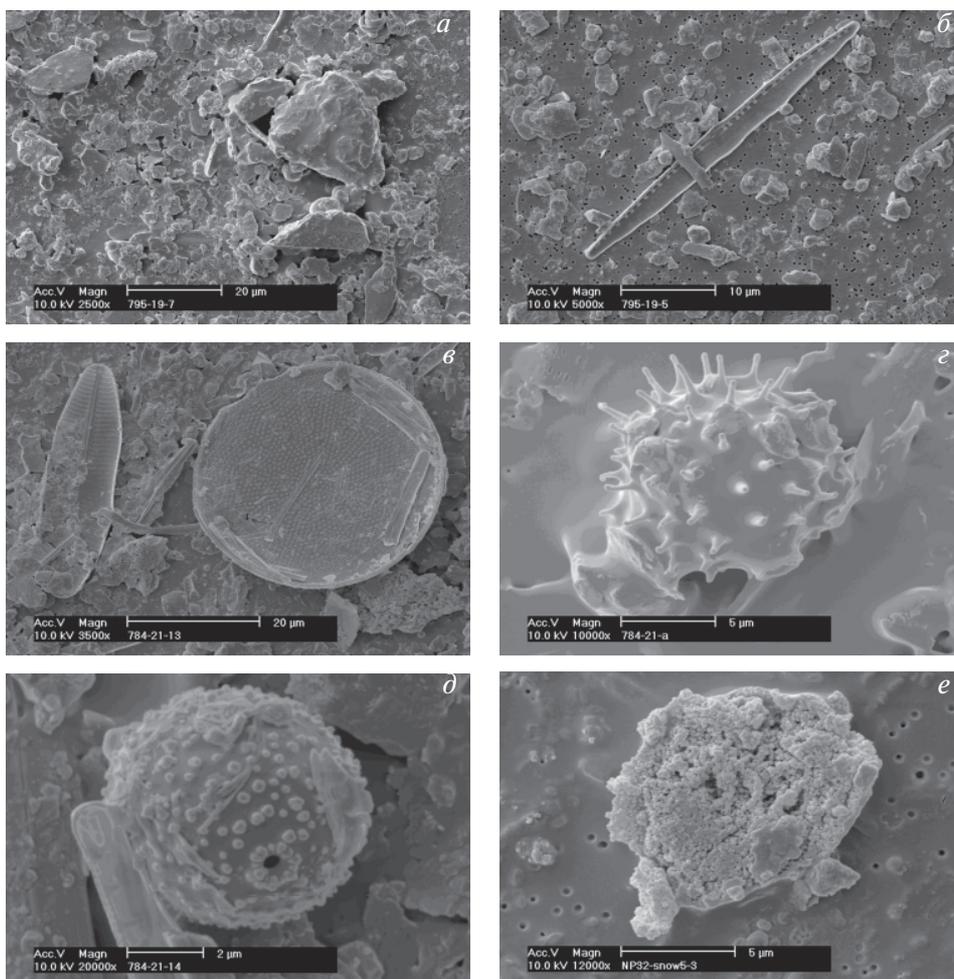


Рис. 2. Характерные нерастворимые частицы, содержащиеся в снежном покрове центральной части Северного Ледовитого океана: *a* – минеральные зерна; *б* – пеннатная диатомея и минеральные зерна; *в* – диатомеи; *г*, *д* – споры; *е* – сажа. Пробы снега были отобраны в ARK-XIV/1a рейсе НИС «Polarstern» в июле 1998 г. (*a–д*) и около дрейфующей станции СП-32 в декабре 2003 г. (*е*)

терные частицы показаны на рис. 2. Соотношение минеральных и биогенных частиц меняется от пробы к пробе.

Пыльца и споры в пробах снега, отобранных около Северного полюса в апреле и мае 2002 г., были детально изучены В.В.Украинцевой [59]. Показано, что пыльца и споры, обнаруженные в пробах, были принесены воздушными потоками из центральных и северо-западных районов Европы (Северная Скандинавия и Кольский полуостров). Растительные волокна длиной до нескольких сотен мкм и пыльца сухопутных растений переносятся ветром на сотни километров; их поступление эоловым путем отмечено, например, на севере Шпицбергена и в Антарктике [36, 39]. В марте 1991 г. перенос на значительное расстояние большого количества пыльцы растений, широко распространенных на севере пустыни Са-

хара, был зарегистрирован на большей части Европы, включая северную часть Скандинавского полуострова. Анализ синоптической ситуации подтвердил, что воздушные массы поступали в Европу в это время из северных районов Африки [34]. Значительное количество пылицы и спор поступает в Северный Ледовитый океан при цветении растений тайги и тундры. Пыльца и споры, обнаруженные в водной взвеси и в донных осадках арктических морей [42, 44] и в кернах бурения ледников арктических островов [26], поступают на морскую поверхность и на острова также в основном за счет дальнего эолового переноса. Растительные волокна выдуваются ветрами с поверхности арктических почв, содержащих большое количество растительных остатков [5, 14].

Диатомеи установлены во всех образцах частиц из снежного покрова льдин в проливе Фрама. Видовой состав диатомей довольно разнообразный, всего Е.И.Поляковой определено более 60 видов и внутривидовых таксонов [23]. При этом как по видовому разнообразию, так и по численности преобладают морские ледовые диатомеи (*Fragilariopsis oceanica*, *F. cylindrus*, *Fossula arctica*, *Nitzschia polaris*) и планктонные диатомеи (*Thalassiosira antarctica*, *T. gravida*, *T. hyperborea*, *T. nordenskiöldii*, *Actinocyclus divisus*, споры и вегетативные клетки видов рода *Chaetoceros*). Пресноводные диатомеи установлены в 8 из 11 исследованных проб. Они представлены типичными речными и озерно-болотными видами, характерными для водоемов крайнего севера Евразии [4, 38]. В большинстве проб снега, собранных нами в других экспедициях, также были отмечены створки диатомовых водорослей (например, рис. 2б, в). Диатомовые водоросли поступают в приводный слой как за счет срыва ветром тонкого поверхностного слоя морской воды, пузырьков и пены (особенно при усилении ветра), так и за счет дальнего переноса пыли с поверхности пересыхающих в конце лета озер в тундре, в которых диатомеи широко распространены [4, 38]. Ранее диатомеи были обнаружены и изучены в аэрозольных пробах из других районов Мирового океана [8]. Очевидно, что только эоловым путем могут поступать пресноводные и морские диатомеи на ледовый купол Антарктиды вблизи Южного полюса, а также на ледовый купол Гренландии [27, 37]. Дополнительным локальным механизмом поставки диатомей в поверхностный слой снега в районе исследований является выдувание их створок из насыщенного осадочным материалом пакового льда («грязного» льда), содержащего диатомеи, принесенные Трансполярным течением с Сибирского шельфа [45, 46].

В большинстве проб снега в небольшом количестве обнаружены сажевые частицы и гладкие сферы сгорания диаметром 0,5–5 мкм, поступающие в атмосферу с выбросами металлургических, горнодобывающих комбинатов, тепловых электростанций, ТЭЦ. Они могут переноситься воздушными массами на большие расстояния. Ранее сферы сгорания были обнаружены в аэрозолях Арктики рядом авторов [22, 35, 54, 55].

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 [23].

Среднее значение отношения C/N нерастворимых частиц в снежном покрове Центральной Арктики в июле 1998 г. было равно 17,2 [22]. Сопоставление этого значения с литературными данными, полученными по составу фитопланктона [51], взвеси рек Лена и Яна [49], донных осадков Центральной Арктики [53] и сухопутной растительности [52], свидетельствует о преобладании терригенной органики в составе нерастворимых частиц, содержащихся в снежном покрове Центральной Арктики.

Содержание взвеси в поверхностном слое снежного покрова губы Чупа (Белое море) в середине марта 2001 г. варьировало от 0,5 до 1,6 мг/л, в среднем

0,72 мг/л [58], а в начале апреля 2002 г. — от 0,22 до 0,50. Результаты сканирующей электронной микроскопии показали, что в составе нерастворимых частиц, содержащихся в снежном покрове губы Чупа, преобладают минеральные частицы размером 1–5 мкм [22]. Часто встречаются диатомеи. Отмечены отдельные сферы сгорания.

Детальные исследования состава снега были проведены в период с 26 марта по 8 апреля 2004 г. на льду губы Чупа, на льду озера Кривое и на открытой от деревьев площадке на холме [56]. Содержание нерастворимых частиц в снеге варьировало от 0,33 до 2,63 мг/л, в среднем составляя 0,84 мг/л ($n = 16$ проб). Такие концентрации нерастворимых частиц характерны для фоновых районов Арктики.

Данные по содержанию нерастворимых частиц в снежном покрове на дрейфующих льдах Арктики были использованы нами для оценки потока эолового материала, поступающего из атмосферы на поверхность Северного Ледовитого океана наравне с данными по аэрозолям [20, 22, 55, 57]. Среднее значение вертикального потока аэрозолей в Арктике составляет по нашей оценке около $600 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$ [57], что значительно выше, чем считалось ранее ($140 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$ [30]). Эта цифра, безусловно, требует дальнейшего уточнения.

Вклад аэрозолей в формирование природной среды Арктики значительно больше и разнообразнее, чем это представлялось ранее. Прежде всего, это касается общего количества аэрозольного материала и его распределения по сезонам года. Общее поступление аэрозолей (нерастворимая часть) в Северный Ледовитый океан (площадь $9,54 \text{ млн км}^2$) по нашим оценкам равно $5,7 \text{ млн т/год}$ [57]. Это много ниже, чем поставка речного осадочного материала в Арктику (около 245 млн т/год) [33, 41]. Однако следует иметь в виду, что главная часть речных взвесей осаждается в маргинальных фильтрах на границе река–море [12, 13]. За пределы фильтра проникает только около 7 %, а области континентального склона достигает около 5 %, т.е. за пределы фильтра в Арктике проникает только 12 млн т взвеси рек. Вклад эолового материала в формирование геохимического и минерального облика водной взвеси, криозоля морских льдов и донных осадков Арктики одного порядка с вкладом взвешенного материала рек и материала морских льдов [32] (рис. 3). Очень большое значение имеет также поступление из атмосферы органического вещества [48]. Для многих элементов (Pb, Sb, Se, V, Zn и др.) в Центральной Арктике аэрозольный источник — главный [20, 22, 25, 50].

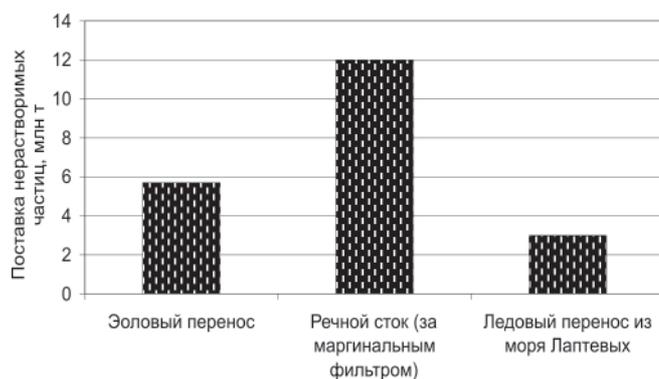


Рис. 3. Соотношение величины эоловой поставки осадочного материала в Центральную Арктику [57] с величинами речного стока осадочного вещества за пределами маргинальных фильтров [22] и ледового переноса из моря Лаптевых [32]

ВЫВОДЫ

1. Осаждение аэрозолей в арктических морях и в Центральной Арктике идет главным образом не на водную поверхность, как в других зонах, а на поверхность льдов. В зоне паковых льдов типична круглогодичная аккумуляция эолового материала на льдах на протяжении 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.

2. Фоновое содержание нерастворимых частиц размером $>0,45$ мкм в снеге Арктики, по нашим данным, находится в пределах 0,2–3 мг/л, что значительно выше, чем концентрация взвеси в морской воде.

3. Осадочный материал в свежевывавшем снеге представлен в основном минеральными и биогенными частицами пелитовой и алевроитовой размерности. Вблизи кромки ледового поля в составе осадочного материала преобладают морские диатомеи, переносимые ветром из районов прикромочного цветения микроводорослей.

4. В большинстве проб в небольшом количестве обнаружены сажа, гладкие сферы сгорания диаметром 0,5–5 мкм, поступающие в атмосферу с выбросами металлургических, горнодобывающих комбинатов, тепловых электростанций, ТЭЦ.

5. Балансные подсчеты, полученные на основе наших определений, показывают, что вклад аэрозолей в формирование осадочного материала в Арктике близок к вкладу речного осадочного вещества – за пределами маргинальных фильтров рек. Для многих элементов (Pb, Sb, Se, V и др.) аэрозольный источник – главный. В целом для Северного Ледовитого океана (пелагиаль) вклад аэрозолей в осадкообразование составляет примерно 10 %.

6. Систематические исследования литологии и геохимии снежного покрова крайне необходимы наряду с всесторонним изучением эолового материала из атмосферы, т.к. снежный покров является естественным коллектором как растворенного, так и взвешенного эолового материала.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы признательны экипажам НИС «Поларштерн», НЭС «Академик Федоров», ГС «Сергей Кравков» и участникам экспедиций на российских дрейфующих станциях и на припайном льду Белого моря за помощь в экспедициях. Мы благодарны У.Бок (U. Bock), Е.О.Золотых, В.А.Карлову, Г.Куну (G.Kuhn), Х.Лоренцен (C.Lorenzen), Е.И.Поляковой, А.А.Урбан за участие в лабораторных исследованиях.

Работа выполнялась при финансовой поддержке Отделения наук о Земле Российской Академии наук (проект «Наночастицы во внешних и внутренних сферах Земли»), гранта поддержки ведущих научных школ № НШ-2236.2006.5, Российско-Германской Лаборатории им. О.Ю.Шмидта.

Авторы благодарят профессоров Й.Тиде (J.Thiede) и Д.Фюттерера (D.Fütterer), Е.-М.Нютик (E.-M.Nöthig), В.Б.Коробова, А.Ю.Богунова за поддержку наших исследований и В.В.Украинцеву за ценные советы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Болтенко Е.Л., Евсеев А.В., Корзун А.В., Сухова Т.Г. Химический состав снежного покрова как показатель загрязнения на Кольском полуострове // Вестник Московского университета. Сер. 5. География. 1991. № 5. С. 60–64.
2. Бояркина А.П., Байковский В.В., Васильев Н.В., Глухов Г.Г., Медведев М.А., Писарева Л.Ф., Резников В.И., Шелудько С.И. Аэрозоли в природных планшетах Сибири. Томск: Изд-во ТГУ, 1993. 157 с.

3. *Василенко В.Н., Назаров И.М., Фридман Ш.Д.* Мониторинг загрязнения снежного покрова. Л.: Гидрометеоздат, 1985. 181 с.
4. *Гецен М.В.* Водоросли в экосистемах Крайнего Севера. Л.: Наука, 1985. 165 с.
5. *Добровольский В.В.* География почв с основами почвоведения. М.: ВЛАДОС, 1999. 384 с.
6. *Евсеев А.В., Красовская Т.М.* Эколого-географические особенности природной среды районов крайнего Севера России. Смоленск: Изд-во СГУ, 1996. 232 с.
7. *Игамбердиев В.М., Терешенков О.М., Кутыев Х.А., Попова Е.Н.* Оценка современного состояния природной среды: Норильский промышленный район // Народное хозяйство Республики Коми. 1994. № 1. С. 54–61.
8. *Казарина Г.Х., Серова В.В.* Диатомеи в эоловой взвеси над Атлантическим океаном // Современный и ископаемый микропланктон Мирового океана. М.С.Бараш (отв. ред.). М.: Наука, 1995. С. 100–107.
9. *Кособокова К.Н., Пантюлин А.Н., Рахор А., Ратькова Т.Н., Шевченко В.П., Агатова А.И., Лапина Н.М., Белов А.А.* Комплексные океанографические исследования в Белом море в апреле 2003 г. // Океанология. 2004. Т. 44. № 2. С. 313–320.
10. *Лисицын А.П.* Процессы океанской седиментации. Литология и геохимия. М.: Наука, 1978. 392 с.
11. *Лисицын А.П.* Ледовая седиментация в Мировом океане. М.: Наука, 1994. 448 с.
12. *Лисицын А.П.* Маргинальный фильтр океанов // Океанология. 1994. Т. 34. № 5. С. 735–747.
13. *Лисицын А.П.* Потоки осадочного вещества, природные фильтры и осадочные системы «живого океана» // Геология и геофизика. 2004. Т. 45. № 1. С. 15–48.
14. *Переверзев В.Н.* Лесные почвы Кольского полуострова. М.: Наука, 2004. 232 с.
15. *Рапута В.Ф., Коковкин В.В.* Методы интерпретации данных мониторинга загрязнения снежного покрова // Химия в интересах устойчивого развития. 2002. Т. 10. № 5. С. 669–682.
16. *Саввичев А.С., Русанов И.И., Мицкевич И.Н., Байрамов И.Т., Леин А.Ю., Лисицын А.П.* Особенности биогеохимических процессов круговорота углерода в водной толще, донных осадках, ледовом и снежном покрове Баренцева моря // Опыт системных океанологических исследований в Арктике. Лисицын А.П., Виноградов М.Е., Романкевич Е.А. (ред.). М.: Научный мир, 2001. С. 394–408.
17. *Тарханов С.Н., Прожерина Н.А., Коновалов В.Н.* Лесные экосистемы бассейна Северной Двины в условиях атмосферного загрязнения: диагностика состояния. Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 2004. 333 с.
18. *Турскова Т.А.* Планета Земля. Полярные широты: Арктика. Антарктика. М.: Вече, 2002. 432 с.
19. *Чурсин В.* Количественное распределение и состав нерастворимых частиц в свежеснежившем снеге Москвы и Кенозерского национального парка // XI Всероссийские юношеские чтения имени В.И. Вернадского. Москва, 2004. Сборник исследовательских работ. М.: Народное образование, 2004. С. 145–149.
20. *Шевченко В.П.* Влияние аэрозолей на среду и морское осадкообразование в Арктике. М.: Наука, 2006 (в печати).
21. *Шевченко В.П., Богунов А.Ю., Гоголицын В.А., Коробов В.Б., Лебедев А.А., Лещев А.В., Толстиков А.В., Филиппов А.С., Яковлев А.Е.* Геохимия снега, льда и воды в устьевой области р. Северная Двина в конце зимнего периода // XVI Международная школа по морской геологии. Москва, 14–18 ноября 2005 г. Тезисы докладов. М.: ГЕОС, 2005. Т. 2. С. 261–262.
22. *Шевченко В.П., Лисицын А.П., Виноградова А.А., Васильев Л.Ю., Иванов Г.И., Ключиткин А.А., Кривс М., Новигатский А.Н., Нюттик Е.-М., Политова Н.В., Селезнев П.В., Серова В.В., Смирнов В.В., Соколов В.Т., Хаас Х., Штайн Р.* 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. Виноградов М.Е., Лаппо С.С. (ред.). Т. 2. М.: Наука, 2004. С. 168–214.
23. *Шевченко В.П., Лисицын А.П., Полякова Е.И., Детлеф Д., Серова В.В., Штайн Р.* Распределение и состав осадочного материала в снежном покрове дрейфующих льдов Арктики (пролив Фрама) // Доклады Академии наук. 2002. Т. 383. № 3. С. 385–389.

24. Юдахин Ф.Н., Лобанова О.А., Тарханов С.Н. Аэротехногенное загрязнение окружающей среды Архангельской агломерации и прилегающих к ней территорий // Геоэкология. 2001. № 4. С. 369–375.
25. Akeredolu F.A., Barrie L.A., Olson M.P., Oikawa K.K., Pacyna J.M., Keeler G.J. The flux of anthropogenic trace metals into the Arctic from the mid-latitudes in 1979/80 // Atmospheric Environment. 1994. V. 28. P. 1557–1572.
26. Andreev A.A., Nikolaev V.I., Bol'shiyanov D.Yu., Petrov V.N. Pollen and isotope investigations of an ice core from Vavilov Ice Cap, October Revolution Island, Severnaya Zemlya Archipelago, Russia // Geographie Physique et Quaternaire. 1997. V. 51. No. 3. P. 379–389.
27. Burckle L.H., Kellogg D.E., Kellogg T.B., Fastook J.L. A mechanism for emplacement and concentration of diatoms in glacial deposits // Boreas. 1997. V. 26. P. 55–60.
28. Caritat P. de, Dyrø M., Niskavaara H., Chekushin V., Bogatyrev I., Reimann C. Snow composition in eight catchments in the Central Barents Euro-Arctic region // Atmospheric Environment. 1998. V. 32. № 14/15. P. 2609–2626.
29. 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. V. 24. P. 166–172.
30. 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.). New York, 1989. P. 657–720.
31. Dibb J.E. Overview of field data on the deposition of aerosol-associated species to the surface snow of polar glaciers, particularly recent work in Greenland // Chemical Exchange Between the Atmosphere and Polar Snow. E.W. Wolff and R.C. Bales (eds.). Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1996. P. 249–274.
32. Eicken H., Reimnitz E., Alexandrov V., Martin T., Kassens H., Viehoff T. Sea-ice processes in the Laptev Sea and their importance for sediment export // Continental Shelf Research. 1997. V. 17. P. 205–233.
33. 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. V. 296. P. 664–691.
34. Hjelmroos M. Long-range transport of biological particles of desert origin: a short review // The Impact of Desert Dust Across the Mediterranean / Eds. S. Guerzoni, R. Chester. Norwell: Kluwer Academic Publishers, 1996. P. 247–252.
35. Ishizaka Y., Hobbs P.V., Radke L.F. Arctic hazes in summer over Greenland and the North American Arctic. II. Nature and concentrations of accumulation-mode and giant particles // J. Atmosph. Chem. 1989. V. 9. P. 149–159.
36. Johansen S., Hafsen U. Airborne pollen and spore registrations at Ny-Alesund, Svalbard, summer 1986 // Polar Research. 1988. V. 6. P. 11–17.
37. Kellogg D.E., Kellogg T.B. Diatoms in South Pole ice: Implications for eolian contamination of Sirius Group deposits // Geology. 1996. V. 24. P. 115–118.
38. 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. H.Kassens, H.A.Bauch, I.A.Dmitrenko, H.Eicken, H.-W.Hubberten, M.Melles, J.Thiede, L.A.Timokhov (eds.). Berlin: Springer-Verlag, 1999. P. 377–406.
39. Linskens H.F., Bargagli R., Cresti M., Focardi S. Entrapment of long-distance transported pollen grains by various moss species in coastal Victoria Land, Antarctica // Polar Biology. 1993. V. 13. P. 81–87.
40. Lisitzin A.P. Sea-ice and Iceberg Sedimentation in the Ocean: Recent and Past. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2002. 563 p.
41. Macdonald R.W., Solomon S.M., Cranston R.E., Welch H.E., Yunker M.V., Gobeil C. A sediment and organic carbon budget for the Canadian Beaufort Shelf // Marine Geology. 1998. V. 144. P. 255–273.
42. Matthiessen J. Distribution of palynomorphs in surface sediments from the Ob and Yenisei estuaries (Kara Sea, Arctic Ocean) // Berichte zur Polarforschung. 1999. No. 300. P. 222–235.

43. Mullen R.E., Darby D.A., Clark D.L. Significance of atmospheric dust and ice rafting for Arctic Ocean sediment // *Geol. Soc. America Bull.* 1972. V. 83. P. 205–212.
44. 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* / H.Kassens, H.A.Bauch, I.A.Dmitrenko, H.Eicken, H.-W.Hubberten, M.Melles, J.Thiede, L.A.Timokhov (eds.). Berlin: Springer-Verlag. 1999. P. 577–585.
45. Nürnberg D., Wollenburg I., Dethleff D., Eicken H., Kassens H., Letzig T., Reimnitz E., Thiede J. Sediments in Arctic sea ice – entrainment, transport and release // *Marine Geology.* 1994. V. 119. P. 185–214.
46. Pfirman S., Lange M.A., Wollenburg I., Schlosser P. Sea ice characteristics and the role of sediment inclusions in deep-sea deposition: Arctic and Antarctic comparisons // *Geological History of the Polar Oceans: Arctic versus Antarctic.* Kluwer Academic Publishers, 1990. P. 187–211.
47. 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.
48. Rachold V., Eicken H., Gordeev V.V., Grigoriev M.N., Hubberten H.-W., Lisitzin A.P., Shevchenko V.P., Schirmeister L. Modern terrigenous organic carbon input to the Arctic Ocean // *The Organic Carbon Cycle in the Arctic Ocean.* Stein R., Macdonald R.W. (Eds.). Berlin-Heidelberg: Springer, 2003. P. 33–56.
49. Rachold V., Hubberten H.-W. Carbon isotope composition of particulate organic material in East Siberian rivers // *Land-Ocean Systems in the Siberian Arctic: Dynamics and History.* Kassens H., Bauch H.A., Dmitrenko I.A. et al. (Eds.). Berlin-Heidelberg-New York: Springer, 1999. P. 223–238.
50. Rahn K.A. Atmospheric, riverine and oceanic sources of seven trace constituents to the Arctic ocean // *Atmospheric Environment.* 1981. V. 15. No. 8. P. 1507–1516.
51. Redfield A.C., Ketchum B.H., Richards F.A. The influence of organisms on the composition of sea water // *The Sea.* Hill M.N., Ed. New York: Wiley, 1963. P. 26–77.
52. Scheffler F., Schachtschnabel P. *Lehrbuch der Bodenkunde.* Enke Verlag, Stuttgart, 1984. 442 p.
53. Schubert C.J., Calvert S.E. Nitrogen and carbon isotopic composition of marine and terrestrial organic matter in Arctic Ocean sediments: implications for nutrient utilization and organic matter composition // *Deep-Sea Research I.* 2001. V. 48. P. 789–810.
54. Sheridan P.J., Musselman I.H. Characterization of aircraft-collected particles present in the Arctic aerosol; Alaskan Arctic, spring 1983 // *Atmospheric Environment.* 1985. V. 19. P. 2159–2166.
55. Shevchenko V. The influence of aerosols on the oceanic sedimentation and environmental conditions in the Arctic // *Berichte zur Polar- und Meeresforschung.* 2003. № 464. 149 p.
56. Shevchenko V.P., Aliev R.A., Bizin M.A., Demina L.L., Filippov A.S., Goralchuk A.V., Gordeev V.V., Koutsenogii K.P., Koutsenogii P.K., Mitrokhov A.V., Novigatsky A.N., Nemirovskay I.A., Smirnov V.V., Tolstikov A.V., Travkina A.V. Multidisciplinary studies in the Chupa Bay, White Sea in March–April 2004 // *Seventh Workshop on Land Ocean Interactions in the Russian Arctic, LOIRA project.* Moscow, November 15–18, 2004. Abstracts. P. 124–125.
57. Shevchenko V.P., Lisitzin A.P. Aeolian input // *The Arctic Ocean Organic Carbon Cycle: Present and Past.* Stein R., Macdonald R.W. (Eds.). Berlin-Heidelberg-New York: Springer, 2003. P. 53–54.
58. Shevchenko V.P., Rat'kova T.N., Bairamov I.T., Boyarinov P.V., Lorentzen C., Mitrokhov A.V., Naumov A.D., Nothig E.-M., Savvichev A.S., Sergeeva O.M., Svertilov A.A. Multidisciplinary studies in the Chupa Bay, White Sea in winter time // *Fifth Workshop on Land-Ocean Interactions in the Russian Arctic.* Moscow, November 12–15, 2002. Abstracts. P. 119–121.
59. Ukraintseva V.V., Sokolov V.T. Polen analysis of snow samples from the North Pole region // *Polar Geography.* 2003. V. 27. No. 3. P. 268–271.
60. Viklander M. Substances in urban snow. A comparison of the contamination of snow in different parts of the city of Lulee, Sweden // *Water, Air, and Soil Pollution.* 1999. V. 114. P. 377–394.
61. Walker T.R., Crittenden P.D., Young S.D. Regional variation in the chemical composition of winter snow pack and terricolous lichens in relation to sources of acid emissions in the Usa river basin, northeast European Russia // *Environmental Pollution.* 2003a. V. 125. P. 401–412.

62. Walker T.R., Young S.D., Crittenden P.D., Zhang H. Anthropogenic metal enrichment of snow and soil in north-eastern European Russia // Environmental Pollution. 2003b. V. 121. P. 11–21.

V.P.SHEVCHENKO, A.P.LISITZIN, R.STEIN, N.V.GORIOUNOVA, A.A.KLYUVITKIN,
M.D.KRAVCHISHINA, M.KRIEWS, A.N.NOVIKATSKY, V.T.SOKOLOV, A.S.FILIPPOV,
C.HAAS

DISTRIBUTION AND COMPOSITION OF PARTICULATE MATTER IN THE ARCTIC SNOW

The results of studies of particulate matter distribution and composition in the Arctic snow, carried out by authors in 1994–2005, and literature data have been summarized. It is shown that background concentration of particles $>0,45 \mu\text{m}$ in the Arctic snow varies from 0,2 to 3 mg/l, that is significantly higher than suspended particulate matter concentrations in the sea water in the same region. Particulate matter in the fresh snow is represented mainly by mineral grains and biogenic particles (spores, pollens, fibers and diatoms) of pelitic and aleuritic grain size. Soot particles and combustion spheres with the diameter 0,5–5 μm have been found in the most part of the samples. Calculations on the base of our data show that the aeolian input of particulate matter to the total sedimentary matter supply to the Arctic Ocean is close to the riverine input (outside the marginal filters). In general, the aeolian input in the sedimentation in the Arctic Ocean is about 10 %.