

А.А. Виноградова<sup>1</sup>, В.П. Шевченко<sup>2</sup>

## Роль атмосферных аэрозолей в загрязнении Северного Ледовитого океана и его морей

<sup>1</sup> *Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН,*

<sup>2</sup> *Институт океанологии им. П.П. Шириова РАН, г. Москва*

Поступила в редакцию 19.01.2005 г.

Оценен вклад атмосферных аэрозолей в содержание четырех микроэлементов (никель, свинец, цинк и кадмий) в водах Северного Ледовитого океана и его морей. Показано, что он вполне сравним с вкладом речной взвеси (после прохождения маргинальных фильтров) выпадающих рек.

В водах Карского моря, моря Лаптевых и Восточно-Сибирского моря атмосферный вклад свинца и кадмия составляет до 15–17% от вклада рек, а для всего океана эти вклады приблизительно одинаковы. В водах Чукотского моря содержание свинца и кадмия в большей степени определяется воздушными вертикальными потоками, вклад которых в несколько раз больше вклада речного стока.

### Введение

Атмосфера (наряду с гидросферой) является одним из каналов поступления вещества и энергии из средних широт в Арктику. Основную массу составляют природные компоненты терригенного или морского происхождения. Однако в индустриальную эпоху в арктической атмосфере резко возросли концентрации антропогенных газов и аэрозолей [1]. Осаждаясь из атмосферы на воду и лед Северного Ледовитого океана (СЛО), на другие объекты природной среды Арктики, атмосферные аэрозоли (в том числе и их антропогенные составляющие) могут влиять на экологические системы региона.

Климатические и природные особенности Арктики таковы, что многие объекты окружающей среды накапливают загрязнения в течение многих лет. В результате антропогенная нагрузка на природу региона возрастает. До настоящего времени влияние аэрозольного вещества на состав водной взвеси и донных отложений СЛО недооценивалось. Однако в [2] было показано, что состав водной взвеси СЛО формируется под воздействием трех основных источников — речного стока, аэрозолей атмосферы и таяния льдов, вклады которых вполне сравнимы между собой.

В местах сезонного таяния морского льда, в полыньях и снежниках, где весной активизируется жизнь вблизи поверхности воды, аэрозоли, в том числе антропогенные, участвуют в биохимических процессах, попадая в состав микроводорослей, являющихся первым звеном в пищевых цепях животных и человека. В условиях сурового холодного климата Арктики с коротким летом многие живот-

ные и растения развиваются медленно и живут долго, накапливая попадающие в них тяжелые металлы и другие загрязнения в течение многих лет. Исследования в рамках программы Arctic Monitoring Assessment (AMAP) [3] показали, что некоторые виды растительности (мхи, лишайники, грибы) и животных (нерпа, тюлень, куропатка, олень карлику) в Арктическом регионе содержат повышенные концентрации тяжелых металлов. Эти объекты входят в рацион питания животных и человека в Арктике и могут оказывать негативное влияние на их жизнедеятельность [1, 3]. В результате даже при сравнительно невысоких уровнях загрязнения атмосферы и водных объектов Арктики содержание антропогенных составляющих в растениях и животных, потребляемых в пищу, может быть значительно выше.

Таким образом, задача определения потоков загрязняющих веществ из атмосферы на подстилающую поверхность в Арктике актуальна не только для геофизиков и океанологов, но также для географов, биологов и специалистов-экологов различного профиля.

### Оценки потоков тяжелых металлов из атмосферы

Для наших оценок были выбраны четыре микроэлемента, имеющие антропогенное происхождение и содержащиеся в атмосфере Арктики на аэрозольных частицах субмикронных размеров. Это тяжелые металлы — никель (Ni), свинец (Pb), цинк (Zn) и кадмий (Cd), приоритетные для изучения

[1] из-за их негативного воздействия на окружающую среду, животных и человека.

Вертикальные потоки этих микроэлементов на поверхность СЛО оценивались нами по данным работ [4, 5] о средних концентрациях микроэлементов в арктической атмосфере в течение года и их средних выпадениях на единицу поверхности в Российской Арктике. Эти результаты были получены путем анализа многолетних рядов ежедневных траекторий переноса воздушных масс и модельных оценок атмосферного переноса и осаждения на поверхность антропогенных аэрозольных примесей в арктических районах России.

В табл. 1 приведены величины средних потоков рассматриваемых микроэлементов за год на единичную площадь в Российской Арктике в сравнении с аналогичными сведениями для других районов.

Рассчитанное нами количество рассматриваемых элементов, которое выпадает за год на поверхность российских морей и на всю территорию СЛО, приведено в табл. 2. Подчеркнем, что используемые нами значения потоков микроэлементов на подстилающую поверхность были получены в [5] таким образом, что характеризуют лишь их антропогенную часть.

Отметим, что значения годовых потоков для СЛО хорошо соответствуют результатам оценок [6], выполненным при двух различных предположениях о количестве осадков на территории СЛО. Интересно, что эти значения близки также к приведенным в [7] оценкам антропогенного вклада в годовые накопления тех же микроэлементов в донных осадках на сравнительно небольшой территории Финского залива Балтийского моря.

Чтобы понять, насколько существен аэрозольный вклад в состав вод СЛО, сопоставим его с вкладом речного стока.

## Методика оценки потоков тяжелых металлов, поступающих с речной взвесью

Данных о потоках и составе нерастворенного вещества, выносимого реками в СЛО, пока немного. Эти исследования в настоящее время активно развиваются. Наиболее многочисленные и достоверные результаты собраны и обобщены в [8, 9].

При оценке вклада речного стока учитывалось, что лишь меньшая часть взвеси, которую несет река, проходит в открытое море (океан) через так называемый маргинальный фильтр [10, 11]. Процессы, преобразующие состав речной воды в таком фильтре, — это целый комплекс физических, химических и биологических явлений и взаимодействий, происходящих при смешивании пресной и соленой воды вблизи впадения реки в море и приводящих к эффективному осаждению самих частиц взвеси и продуктов ее биотрансформации в пространстве до первых десятков тысяч квадратных километров вблизи устья реки. В результате, по нашим оценкам, сделанным по материалам [9], в среднем около 11% массы каждого из рассматриваемых антропогенных микроэлементов, содержащейся в речной взвеси северных рек России, проходит через фильтр и формирует состав вод соответствующего моря и СЛО в целом.

Содержание микроэлемента во взвеси выпадающих рек каждого моря рассчитывалось по данным [9] о средних годовых суммарных потоках речной воды и составе взвеси выпадающих рек. Поскольку в [9] имеются данные о составе взвеси только отдельных рек, при оценках для Карского моря использовались значения, усредненные по двум рекам (Обь и Енисей), для моря Лаптевых — по трем рекам (Лена, Яна и Хатанга), а в остальных трех случаях — по шести рекам (все, перечисленные выше, плюс Колыма).

Таблица 1

Потоки микроэлементов за год на единицу площади в Российской Арктике и над морями в других районах,  $\text{мкг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$  ( $\text{г} \cdot \text{км}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$ )

Территория	Ni	Pb	Zn	Cd	Комментарии
Российская Арктика [5]	5,7	16	9,8	0,5	Антропогенная часть, 1986–1995 гг.
Гренландское море [14]	65	60	—	1,5	Экспериментальные измерения, 1995–1997 гг.
Средиземное море [15]: о. Корсика побережье Франции	430 1600	880 30000	4600 100000	550 1600	
Балтийское море [16]	—	1600	—	70	Модельные оценки, 1991–1995 гг.

Таблица 2

Средние годовые потоки антропогенных микроэлементов на поверхность Северного Ледовитого океана и его морей,  $\text{т} \cdot \text{год}^{-1}$

Территория	Площадь [17], $10^6 \text{ км}^2$	Ni	Pb	Zn	Cd
Баренцево море	1,42	8,5	31	18,5	0,68
Карское море	0,88	5,3	14	9,2	0,39
Море Лаптевых	0,66	3,6	8,2	5,1	0,23
Восточно-Сибирское море	0,91	5,4	11	8,1	0,36
Чукотское море	0,59	3,4	9,5	5,8	0,30
Северный Ледовитый океан	13,2	75	210	130	6,6

## Сравнение атмосферных и речных потоков тяжелых металлов, поступающих в воды СЛО и его морей

При сравнении вкладов атмосферных потоков и речного стока учитывалось, что часть площади каждого моря занята устьевыми зонами (маргинальными фильтрами) впадающих в него рек. Эта часть зависит от мощности речного потока, солености моря и других факторов [12]. В связи с этим мы принимали долю площади, занимаемую маргинальными фильтрами впадающих рек, для Карского моря, моря Лаптевых, Восточно-Сибирского и Чукотского морей и всего СЛО соответственно 10, 10, 5, 2 и 3%. Потоки тяжелых металлов из атмосферы рассчитывались на остающуюся площадь морской акватории за пределами зон фильтров.

Рис. 1 и 2 наглядно иллюстрируют полученные соотношения вертикальных (из атмосферы) и горизонтальных (с речным стоком) потоков рассматриваемых тяжелых металлов для каждого моря и всего океана. Видно, что относительный вклад аэрозоля в содержание свинца и кадмия в водах всех морей

и океана в целом значительно выше, чем для двух других элементов, и вполне сопоставим с вкладом речного стока. При этом еще раз подчеркнем, что мы оценивали лишь антропогенную часть микроэлементов, содержащихся в аэрозоле арктической атмосферы, и, следовательно, антропогенную часть потоков этих элементов, выпадающих на поверхность СЛО и его морей. Реальные же средние потоки тяжелых металлов на поверхность могут быть значительно выше (за счет составляющих природного происхождения, источниками которых могут быть вулканы, пожары, морская поверхность и т.д.). В результате и для других элементов атмосферные вклады в состав морской воды могут оказаться сравнимыми с вкладом речного стока.

Из рис. 1 и 2 следует также, что состав вод Чукотского моря в значительной степени формируется атмосферными потоками вещества на поверхность. Несомненно, что для этого района СЛО необходимо учитывать вклад вещества, приносимого берингоморскими течениями из Тихого океана. В этой связи значительный интерес представлял бы анализ состава вод и донных отложений Чукотского моря в сравнении с остальными северными морями России.

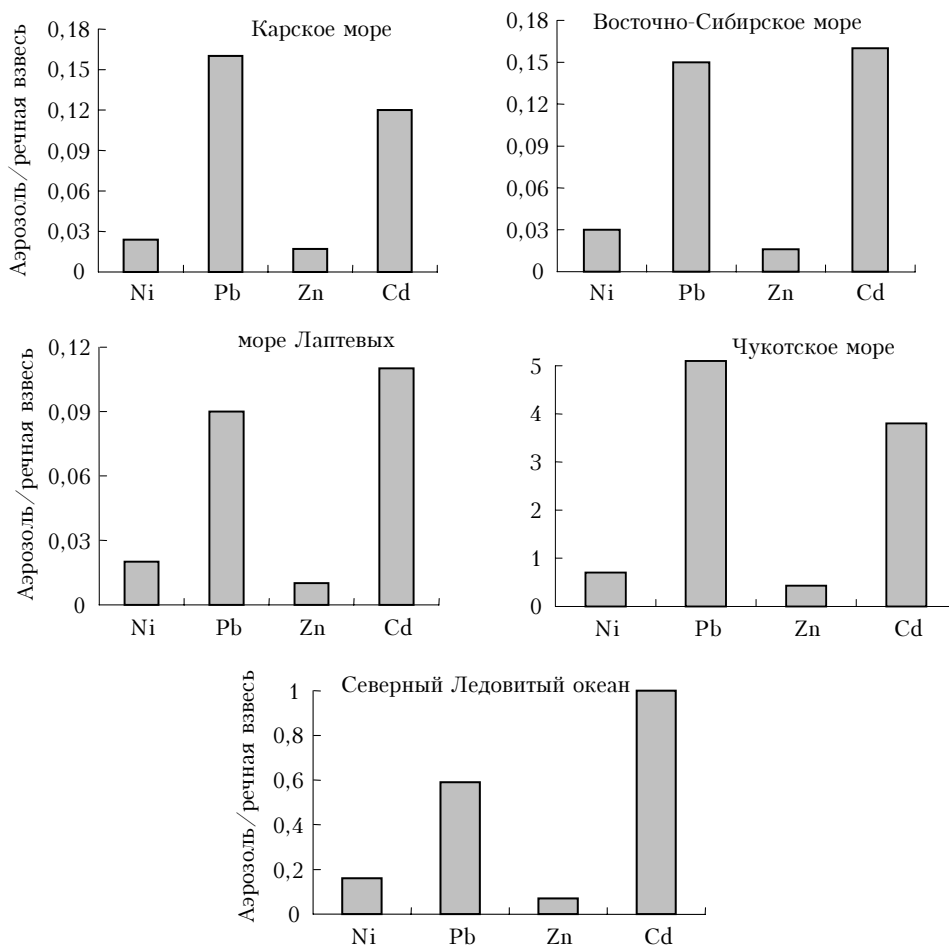


Рис. 1. Отношение вкладов аэрозоля и речной взвеси в содержание разных элементов в водах морей и всего СЛО в целом (для СЛО учтены только реки Евразии)

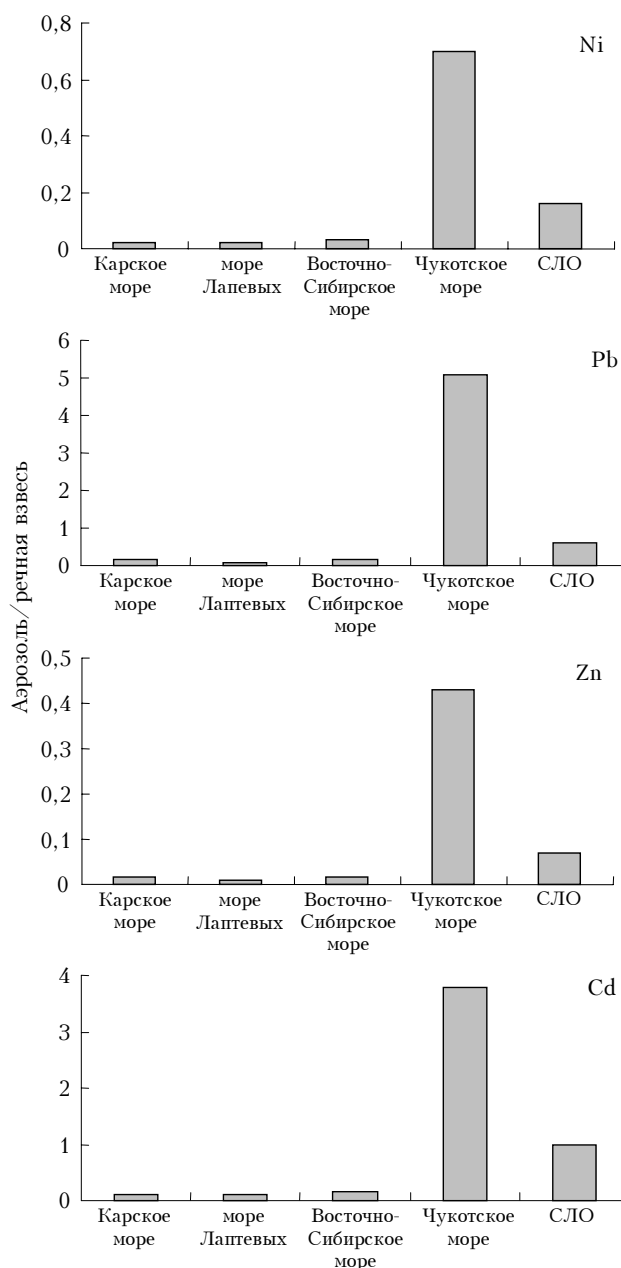


Рис. 2. Отношение вкладов аэрозоля и речной взвеси в содержание каждого элемента в водах разных морей и всего СЛО в целом (для СЛО учтены только реки Евразии)

Можно заметить, что мы не проводили сравнения вкладов атмосферных аэрозолей и выпадающих рек для Баренцева моря. Это связано с тем, что на состав его вод в еще меньшей степени, чем на воды Чукотского моря, воздействуют реки, объем стока которых невелик [9]. Зато вклад атлантических течений (и в первую очередь, Гольфстрима) в формирование состава вод Баренцева моря может быть определяющим. К сожалению, нам не удалось найти количественные данные о составе атлантических вод, поступающих в Баренцево море.

Необходимо иметь в виду, что разные элементы находятся в воде в разных химических соединениях, в результате чего они входят не только в со-

став взвеси, но и в раствор. Следовательно, сравнение вклада аэрозоля с вкладом взвешенного вещества речного стока дает неполное, а иногда и неправильное представление о соотношении в целом вкладов атмосферы и рек в состав морских вод. В качестве примера рассмотрим рис. 3. Видно, что вещества, содержащие никель, в значительной степени растворены в воде, тогда как свинец практически весь содержится во взвеси.

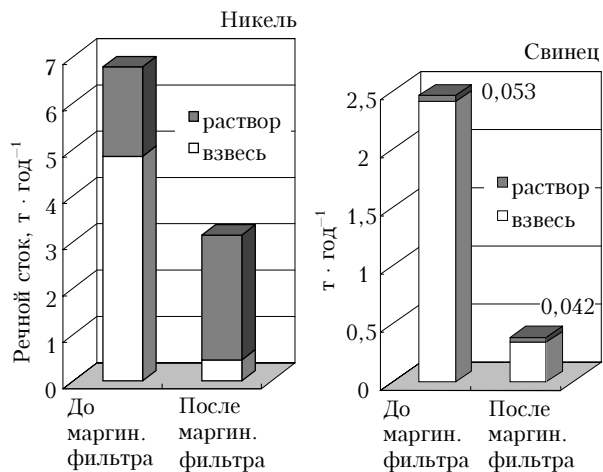


Рис. 3. Речной сток никеля и свинца в растворенной форме и во взвеси до и после маргинальных фильтров евразийских рек, выпадающих в СЛО (по данным [9])

При прохождении через маргинальные фильтры большая часть (до 85–97%) речной взвеси осаждается и выводится из состава морских вод, тогда как в растворенном веществе содержание конкретного микроэлемента меняется не так сильно и может не только уменьшиться (свинец), но даже возрасти (никель). Поэтому для элементов, содержащихся в основном во взвеси рек (это не только свинец, но также цинк и кадмий [9]), общие закономерности, выведенные нами из рис. 1 и 2 в начале этого раздела, можно качественно распространить и на соотношения вкладов в состав вод морей и СЛО атмосферного аэрозоля и рек в целом. Однако для никеля это не так: соотношения, приведенные на рис. 1 и 2 для никеля, относятся только к вкладам атмосферного аэрозоля и нерастворенного вещества речного стока.

## Влияние аэрозолей на поверхность СЛО

Рис. 4 показывает, как формируется в течение года поток тяжелых металлов из атмосферы на поверхность в разных районах Российской Арктики. Количество осаждаемого в разные сезоны вещества определяется его содержанием в атмосфере и количеством осадков. Видно, что максимальные осадения происходят зимой и весной, когда велики концентрации тяжелых металлов в арктической атмосфере, а в районах, удаленных от Атлантического и Тихого океанов, еще и осенью, когда после лета возрастает содержание примесей в атмосфере при

значительном количестве осадков. Таким образом, если говорить о влиянии атмосферных аэрозолей и содержащихся в них загрязнений на окружающую среду Арктики, то необходимо учитывать, что большая часть этого вещества попадает на лед, а не на водную поверхность СЛО и его морей.

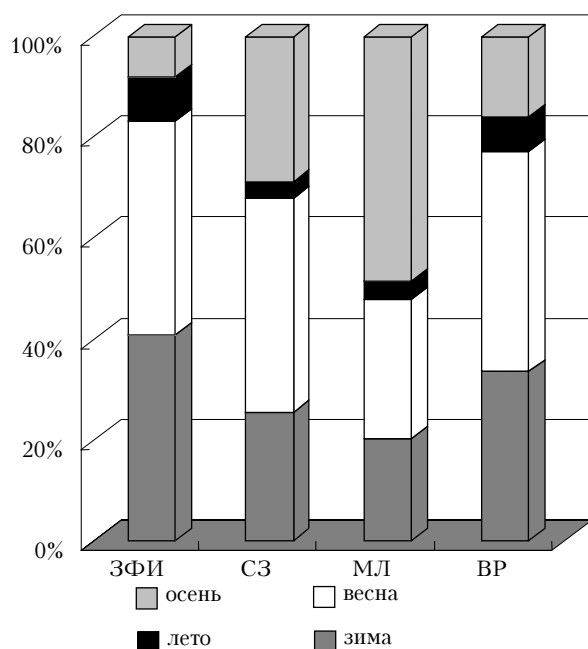


Рис. 4. Формирование годового потока микроэлементов из атмосферы на поверхность за четыре сезона (по 3 мес каждый) в районах Земли Франца Иосифа (ЗФИ), Северной Земли (СЗ), моря Лаптевых (МЛ) и о. Врангеля (ВР)

Перераспределяясь в толще льда в результате таяния снега и льда, антропогенные аэрозоли накапливаются в паковых льдах и разносятся в пределах всего океана при циркумполярном перемещении льда от российского побережья к проливу Фрама [12]. Там происходят таяние льдов и их разгрузка от примесей в воды северной части Атлантического океана. Время такого цикла от 2 до 15 лет, в течение которых паковые льды накапливают и перераспределяют антропогенные загрязнения в Арктическом регионе.

Попадая в конечном счете в воды СЛО, атмосферный аэрозоль участвует в формировании их состава и, в той или иной мере, состава донных осадков. Процессы, происходящие со взвесью от момента ее попадания в морскую воду до связывания в донных осадках, весьма многообразны – от биохимической трансформации планктоном и бентосом до механического осаждения продуктов этой переработки и самих частиц взвеси [10, 11]. На процесс осадконакопления влияют также течения, волнение на поверхности (для прибрежных зон), глубина, рельеф дна и многие другие климатические и геофизические факторы [13]. В результате скорость накопления и качество донных отложений в разных частях СЛО и в его морях могут сильно различаться. Соответственно различными оказыва-

ются и последствия осаждения аэрозольных загрязнений из атмосферы на поверхность в разных частях СЛО.

## Выводы

Атмосфера является одним из каналов поступления вещества, в том числе антропогенных примесей, в акваторию Северного Ледовитого океана. Роль атмосферных аэрозолей в загрязнении природной среды Арктики весьма разнообразна. Выпадая на подстилающую поверхность, антропогенные аэрозольные составляющие, в частности тяжелые металлы, входят в состав морских вод, растений, почв и животных, влияя на различные экологические системы региона.

Вклад атмосферных аэрозолей в состав вод Северного Ледовитого океана и его морей вполне сравним с вкладом речной взвеси (после прохождения маргинальных фильтров), особенно для таких антропогенных микроэлементов, как свинец и кадмий.

В водах Карского моря, моря Лаптевых и Восточно-Сибирского моря атмосферный вклад этих элементов составляет до 15–17% от вклада выпадающих рек, а для всего океана эти вклады почти одинаковы. В водах Чукотского моря содержание свинца и кадмия в большей степени определяется воздушными вертикальными потоками, вклад которых в несколько раз больше вклада речного стока. Многообразие и принципиальная значимость физических процессов, химических и биологических преобразований, в которых могут участвовать аэрозоли, попадая на поверхность Северного Ледовитого океана, диктуют необходимость дальнейшего всестороннего изучения этих явлений.

Авторы признательны за поддержку и ценные рекомендации академику А.П. Лисицыну, профессору Р. Штайну (R. Stein) и В.В. Гордееву.

Работа была выполнена при финансовой поддержке Президиума РАН (проект «Наночастицы во внешних и внутренних сферах Земли»), гранта поддержки ведущих научных школ № НШ-1940.2003.5 и Российско-немецкой лаборатории им. О.Ю. Шмидта.

1. Арктика на пороге третьего тысячелетия (ресурсный потенциал и проблемы экологии). СПб.: Наука, 2000. 247 с.
2. Шевченко В.П., Лисицын А.П., Виноградова А.А., Смирнов В.В., Серова В.В., Штайн Р. Аэрозоли Арктики – результаты десятилетних исследований // Оптика атмосф. и океана. 2000. Т. 13. № 6–7. С. 551–576.
3. AMAP. Arctic Pollution Issues: A State of the Arctic Environment Report. Oslo: AMAP, 1997. 188 p.
4. Vinogradova A.A. Anthropogenic pollutants in the Russian Arctic atmosphere: sources and sinks in spring and summer // Atmos. Environ. 2000. V. 34. N 29–30. P. 5151–5160.
5. Виноградова А.А., Пономарева Т.Я. Сезонные изменения атмосферных концентраций и выпадений антропогенных примесей в Российской Арктике // Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана. 2001. Т. 37. № 6. С. 761–770.

6. *Akeredolu F.A., Barrie L.A., Olson M.P., Oikawa K.K., Pacyna J.M., Keeler G.J.* The flux of anthropogenic trace metals into the Arctic from the mid-latitudes in 1979/80 // *Atmos. Environ.* 1994. V. 28. N 8. P. 1557–1572.
7. *Vallius H.* Anthropogenically derived heavy metals in recent sediments of the Gulf of Finland, Baltic Sea // *Chemosphere.* 1999. V. 38. N 5. P. 945–962.
8. *Gordeev V.* Heavy metals in the Russian Arctic Rivers and some of their estuaries: concentrations and fluxes // *Proc. of AMAP Workshop on Sources, Emissions and Discharges* / Ed. by J.M. Pacyna. NILU OR 3/2002. 2002. N 3. P. 79–100.
9. *Гордеев В.В.* Реки Российской Арктики: потоки осадочного материала с континента в океан // *Новые идеи в океанологии* / Под ред. М.Е. Виноградова, С.С. Лаппо. М.: Наука, 2004. Т. 2. С. 113–167.
10. *Лисицын А.П.* Маргинальный фильтр океанов // *Океанология.* 1994. Т. 34. № 5. С. 735–747.
11. *Лисицын А.П.* Потоки осадочного вещества, природные фильтры и осадочные системы «живого океана» // *Геол. и геофиз.* 2004. Т. 45. № 1. С. 15–48.
12. *Лисицын А.П.* Ледовая седиментация в Мировом океане. М.: Наука, 1994. 448 с.
13. *Геоэкология шельфа и берегов морей России* / Под ред. Н.А. Айбулатова. М.: Ноосфера, 2001. 428 с.
14. *Mart L.* Seasonal variations of Cd, Pb, Cu and Ni levels in snow from the eastern Arctic Ocean // *Tellus.* 1983. V. 35. N 2. P. 131–141.
15. *Ridame C., Guieu C., Loje-Pilot M.-D.* Trend in total atmospheric deposition fluxes of aluminium, iron, and trace metals in the northwestern Mediterranean over the past decade (1985–1997) // *J. Geophys. Res. D.* 1999. V. 104. N 23. P. 30,127–30,138.
16. *Tarrasón L., Barrett K., Erdman L., Gusev A.* Atmospheric Supply of nitrogen, lead and cadmium to the Baltic Sea. EMEP Summary Modelling Report for 1991–1995. EMEP/ MSC-W, 1997. 40 p.
17. *Малый атлас мира.* М.: АТКАР–ПКО «Картография» и «АСТ-ПРЕСС», 1998. 351 с.

*A.A. Vinogradova, V.P. Shevchenko.* **The role of atmospheric aerosols in pollution of the Arctic Ocean and its seas.**

Contribution of atmospheric aerosols into content of four microelements (Ni, Pb, Zn, and Cd) in waters of the Arctic Ocean and its seas is estimated. Their contribution is shown to be quite comparable with that of the suspended matter (after marginal filters) of the inflowing rivers. The atmospheric contribution of Pb and Cd into waters of the Kara Sea, the Laptev Sea, and the East Siberian Sea makes up to 15–17% of river contribution, and for the whole ocean the both are almost equal. The content of Pb and Cd in the Chukchi Sea water is mostly determined by fluxes from the atmosphere, which are several times higher than the riverine input.