DOI: 10.17117/na.2016.12.02.394

Поступила (Received): 06.12.2016

<http://ucom.ru/doc/na.2016.12.02.394.pdf>**Шевченко В.П.****Роль аэрозолей в загрязнении морей и океанов
тяжелыми металлами и климатических изменениях****Shevchenko V.P.****The role of aerosols in pollution of seas and oceans
by heavy metals and in climate change**

В статье приведён литературный обзор, посвященный оценке роли аэрозолей в загрязнении морей и океанов тяжелыми металлами и климатических изменениях. Воздушный перенос Pb, Cd, Zn и Cu является основным путем поставки этих токсичных тяжелых металлов в морские экосистемы Северного полушария. Атмосферная поставка Pb и Cd в открытые районы океана в несколько раз превышает их речной сток. Сильное воздействие на климат оказывают частицы аэрозольного черного углерода (сажи)

Ключевые слова: аэрозоли, Мировой океан, Арктика, загрязнение, тяжелые металлы, черный углерод

The literature review devoted to estimation of the role of aerosols in pollution of seas and oceans by heavy metals and in climate change is presented in the article. Atmospheric transport of Pb, Cd, Zn and Cu is the main pathway of delivery of these toxic heavy metals to the Northern Hemisphere marine ecosystems. Atmospheric input of Pb and Cd to the open ocean areas is few time larger than their riverine discharge. Black carbon (soot) particles in the atmosphere strongly influence the climate

Key words: aerosols, World Ocean, Arctic, pollution, heavy metals, black carbon

Шевченко Владимир Петрович

Кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН

г. Москва, Нахимовский пр., 36

Shevchenko Vladimir Petrovich

Candidate of Geologo-Mineralogical Sciences, Leading Scientist

P.P. Shirshov Institute of Oceanology,

Russian Academy of Sciences

Moscow, Nakhimovsky ave., 36

*Работа выполнена при финансовой поддержке Президиума РАН
(Программа 3 фундаментальных исследований)*

Атмосфера – один из каналов обмена и перераспределения вещества на Земле. Тот факт, что атмосфера содержит взвешенные в воздухе частицы аэрозоля, имеет важное значение, оказывая существенное влияние на формирование качества воздуха, дальность видимости, разнообразные гетерогенные химические реакции, происходящие на поверхности частиц аэрозоля, и на климат [1–6]. Аэрозолем называется совокупность мельчайших частиц или жидких капелек, взвешенных в газовой фазе [4]. Существуют два главных источника аэрозольных частиц в атмосфере: первичное вещество частиц, возникающее при диспергировании материала с поверхности Земли, и вторичное, которое

образуется в результате химических реакций в верхних слоях атмосферы [2, 4]. В число первичных частиц входят частицы биологического происхождения (пыльца, споры, микроорганизмы), частицы, образующиеся при лесных пожарах, минеральная пыль, поступающая в атмосферу с суши, кристаллы морской соли, выдуваемые ветром из поверхностного микрослоя морей и океанов, а также антропогенный материал. Следствием быстрого промышленного развития и роста численности населения явилось сильное возрастание антропогенных загрязнений атмосферы за счет промышленных и сельскохозяйственных источников. Значительная часть этих загрязнений переносится с воздушными массами в акватории морей и океанов. Аэрозоли также оказывают существенное влияние на климат [6].

В данной статье представлен литературный обзор о роли аэрозолей в загрязнении морей и океанов тяжелыми металлами и климатических изменениях.

История исследований.

Ещё в январе 1832 г. Ч. Дарвин во время экспедиции на судне «Бигль» описал выпадение большого количества пыли из атмосферы над Атлантическим океаном в районе островов Зелёного мыса [7, 8]. В дальнейшем Ч. Дарвин собрал сведения об аналогичных событиях и нашёл не менее 15 различных сообщений о пыли, осевшей на кораблях в Атлантическом океане вдали от берегов. Изучение состава собранной им пыли показало, что она состоит из мелких минеральных частиц с примесью биогенных частиц (панцирей пресноводных инфузорий, спор сухопутных организмов). По направлению ветра во время выпадения из атмосферы большого количества пыли, а также по тому, что она обычно выпадает как раз в те месяцы, когда харматан (сухой и пыльный западноафриканский пассат, дующий из Сахары по направлению к Гвинейскому заливу в период с конца ноября по начало марта) поднимает облака пыли в верхние слои атмосферы, Ч. Дарвин сделал вывод, что вся эта пыль приносится из Африки.

Работы по изучению аэрозолей (воздушной взвеси) над океанами и морями были начаты в Институте океанологии АН СССР в 1949 г. А.П. Лисицыным [9]. В ходе более 300 рейсов крупных судов Института океанологии РАН в разные океаны, а также в многочисленных рейсах судов в моря, омывающие берега нашей страны, удалось получить огромный материал по распределению, составу и свойствам аэрозольного вещества [10–21].

В дальнейшем к этим исследованиям подключились учёные из других институтов СССР и зарубежных стран [22–33]. Исследования состава аэрозолей и степени их антропогенного загрязнения проводились как на борту научно-исследовательских судов, так и на береговых аэрозольных обсерваториях, расположенных на островах или на побережье морей и океанов. Это позволило получить большой массив данных о пространственной и временной изменчивости концентраций аэрозолей и их потоках на поверхность Мирового океана.

Вклад аэрозольного материала в осадконакопление

По ряду признаков А.П. Лисицын выделяет зоны аридной седиментации, т.е. определенной климатом (недостатком воды), подготовкой рассеянного аэрозольного вещества на суше, его транспортировкой ветром на разных

высотных уровнях и отложением на поверхность Мирового океана [13, 14]. Именно в этих зонах поступает в атмосферу, а затем отлагается в морях и океанах наибольшее количество нерастворимых частиц. По своему размеру это в основном микро- и наночастицы (94% по массе мельче 2 мкм) [13].

Обобщив обширный накопленный материал по рассеянному аэрозольному осадочному веществу в атмосфере и его потокам, А.П. Лисицын выделил 4 главных центра подготовки (рассеяния, выдувания) аэрозольного вещества на суше, которыми определяются области захвата, переноса и отложения в океане [13]:

– Питающая провинция Северной Африки (пустыня Сахара и полупустынный район Сахель). Оттуда рассеянное аэрозольное вещество переносится в основном на северо-запад (в Атлантический океан) и на север (в Средиземное море и Европу).

– Восточно-Азиатский центр развеивания. Питающая провинция Северной Африки продолжается на восток пустынями Аравии, Средней Азии (Каракум, Кызылкум, Муюнкум), а ещё восточнее пустынями Китая и Монголии (Такла-Макан, Цайдам, Гоби). Общее направление переноса аэрозолей здесь с запада на восток, в сторону Тихого океана.

– Австралийский центр развеивания.

– Южно-Американский центр развеивания.

Основные источники терригенных аэрозолей и их вертикальные потоки на поверхность Мирового океана показаны на рис. 1.

Рис. 1. Основные источники аэрозолей на суше (выделены тёмно-серой заливкой), вертикальные потоки терригенных аэрозолей из атмосферы на поверхность Мирового океана ($\text{мг}/\text{м}^2/\text{год}$); красной заливкой выделены районы с потоками аэрозолей выше $10000 \text{ мг}/\text{м}^2/\text{год}$ [13, 26]

Общий вклад аридной эоловой седиментации в поставку осадочного вещества в Мировой океан А.П. Лисицын определяет в 1,6 млрд т в год [12, 13]. Это близко к поступлению в пелагиаль речного осадочного вещества (за пределами маргинальных фильтров рек, где осаждается 90–95% речной взвеси [34]) (1,8 млрд т в год) [11, 14].

Роль аэрозолей в загрязнении морей и океанов тяжелыми металлами.

Наиболее высокие концентрации тяжелых металлов в морских аэрозолях регистрируются над внутренними морями, расположенными вблизи от промышленно развитых районов (например, Балтийское, Северное, Черное, Средиземное, Каспийское, Желтое моря, многие заливы Северной Атлантики и северной части Тихого океана) [20, 26, 31, 32, 35–43 и др.]. Концентрации Pb, Cd, Zn, Ni, Co, Cr, As над этими морями во много раз превышают фоновые значения, характерные для удалённых от суши районов Мирового океана. Основными источниками тяжелых металлов, поступающих в атмосферу, являются промышленные предприятия (в первую очередь металлургические), транспорт, отопительные системы, сжигание попутных газов на нефтегазовых месторождениях. Концентрации тяжелых металлов увеличиваются при поступлении воздушных масс со стороны крупных индустриальных центров.

Сравнение поступления тяжёлых металлов из атмосферы с их речным стоком за пределами маргинальных фильтров показало, например, что в Балтийском море атмосферная поставка Pb и Cd примерно на 50% превышает речную [40]; в Средиземном море атмосферная поставка растворенного и взвешенного Pb существенно превышает его речной сток [38], а поставка растворённых форм Cr, Cu, Co, Zn, Mn, Al, Fe, Cd из атмосферы в северо-западную часть Средиземного моря существенно превышает их поступление с речным стоком [36].

Следствием быстрого промышленного развития Китая и роста численности населения явилось сильное возрастание антропогенных загрязнений атмосферы за счет промышленных и сельскохозяйственных источников, к которому добавляются еще и мощные выбросы в атмосферу пылевого аэрозоля во время возникновения пылевых бурь в северо-западном Китае, особенно весной [6]. Транстихоокеанский перенос аэрозолей, в том числе антропогенных загрязнений, изучался многими авторами. Повышенные концентрации загрязняющих веществ (включая тяжелые металлы) регистрировались в аэрозолях удаленных от суши районов западной части Тихого океана во время поступления воздушных масс со стороны Китая [43].

Оценка роли атмосферной поставки тяжелых металлов в удаленные от суши районы Мирового океана, выполненная большим коллективом учёных [26], показала, что наиболее важным воздушный перенос является для Pb. Поступление из атмосферы его растворённой формы в 40 раз превышает её речной сток, а поставка взвешенных форм (связанных с микро- и наночастицами) воздушным и речным (за пределами маргинальных фильтров рек) примерно равны. Поставка растворённых форм Cd и Zn в открытые районы океанов в несколько раз превышает их речной сток, а в поставке взвешенных форм этих

металлов преобладает речной сток. В поставке в океан Cu, Ni и As вклад воздушного переноса и речного стока близки по величине.

Большой интерес для учёных представляет изучение роли аэрозолей в загрязнение Арктики – Северного Ледовитого океана, его морей и прилегающих участков водосборного бассейна. Сравнительно с другими климатическими поясами здесь существуют особые условия, определяющие количество, свойства и состав аэрозольного материала. Прежде всего, это положение в высоких широтах – в области глобальной дивергенции в ячейках вертикальной циркуляции. Здесь происходит выход аэрозольного материала стратосферы (максимум содержания на высотах около 20 км), его смешение с материалом тропосферы и опускание в приземные слои с развитой облачностью, откуда этот материал осаждается [12, 14]. Эта модель подтверждается изучением радиоактивных выпадений после ядерных испытаний [44]. Меридиональная циркуляция усиливается зимой [45].

На основании геохимических исследований и изучения загрязнений арктической атмосферы удалось выявить главные точечные и локальные источники загрязнений (промышленные центры Западной Европы и Северной Америки, Норильск, Кольский п-ов, нефтяные факелы Западной Сибири и северо-востока Европейской части России) [46–58]. Удалось по соотношениям элементов установить "лицо" загрязнений из каждого источника (из крупнейших промышленных областей), проследить конкретные траектории происхождения воздушных масс в Арктике и связанных с ними конкретных загрязнений, места главной разгрузки воздушных масс (депоцентры), сезонный ход процессов.

Рис. 2. Соотношение атмосферной поставки Ni, Cu, Pb и Cd от двух регионов-источников (Кольского полуострова (К) и Норильска (Н)) и речного стока (после маргинального фильтра) в моря Российской Арктики [65, 66]

Роль атмосферных аэрозолей в загрязнении Северного Ледовитого океана, его морей и водосборов весьма разнообразна. Осаждающиеся из атмосферы антропогенные аэрозоли входят в состав морских вод, растений, животных. Вклад эолового материала в формирование состава вод и донных осадков Северного Ледовитого океана и его морей вполне сравним с вкладом речной взвеси (за пределами маргинальных фильтров), особенно для таких антропогенных микроэлементов как свинец и кадмий [46, 59–64].

Вклад атмосферного переноса только со стороны антропогенных источников Кольского полуострова (в первую очередь, медно-никелевых комбинатов в Мончегорске и Никеле) в поступление никеля, меди, кадмия и мышьяка в воды Белого и Баренцева морей преобладает над вкладом речного стока [51]. Поступление меди и никеля из атмосферы в воды Карского моря лишь незначительно уступает их поступлению с речным стоком рек Оби и Енисея за пределами их маргинальных фильтров (рис. 2).

Влияние морских аэрозолей на климат

Аэрозоли оказывают существенное влияние на климат [6]. Наиболее сильное воздействие на климат оказывают частицы черного углерода (сажи). Черный углерод (ЧУ) – мельчайшие частицы, образующиеся при сжигании органического топлива, горении биомассы (главным образом – лесных и степных пожарах). Сажа также как и парниковые газы влияет на радиационные свойства атмосферы [67]. Сажа способна переноситься ветрами на сотни и тысячи километров. По оценкам [68] сажевый углерод приводит к снижению альбедо арктического снежно-ледового покрова, что может вызвать увеличение поставки тепла за счет солнечной радиации и оказать существенное влияние на климат Северного полушария в ближайшие десятилетия.

В последние 25–40 лет концентрации черного углерода регулярно измеряют на станциях мониторинга. Дополнительную важную информацию о распределении черного углерода над морями и океанами получают в ходе экспедиционных исследований на научно-исследовательских судах [69–75].

Например, распределение черного углерода в приводном слое атмосферы над Белым, Баренцевым, Карским морями и морем Лаптевых изучено в экспедиции на борту НИС «Академик Мстислав Келдыш» с 26 августа по 6 октября 2015 г. (рис. 3) [75].

Всего за время рейса было выполнено 54 определения концентрации ЧУ в приводном слое атмосферы российских морей Арктики (рис. 3). Среднее содержание для всех исследуемых морей составило 34 нг/м^3 , максимальные концентрации характерны для промышленных районов г. Архангельска (фильтр № 83 – 116 нг/м^3) и порта Тикси (фильтр № 120 – 112 нг/м^3), минимальные – для северных областей Карского моря (фильтры № 111, 112, 141, 142 $< 10 \text{ нг/м}^3$), а также моря Лаптевых (фильтры № 114, 124, 136, 137 $< 10 \text{ нг/м}^3$).

Районы-источники черного углерода оценивали с помощью моделей HYSPLIT расчета обратных траекторий переноса воздушных масс (<http://www.arl.noaa.gov/ready.html>) [76] и FLEXPART (<http://www.flexpart.eu>).

Рис. 3. Концентрации черного углерода (сажи) в приводном слое атмосферы, измеренные в 63-м рейсе НИС «Академик Мстислав Келдыш» [75].
Цифрами около кружков показаны номера фильтров

При прохождении ряда участков маршрута судна воздушные массы поступали из фоновых районов, поэтому измеренные концентрации черного углерода в воздухе были низкими. При прохождении других участков воздушные массы поступали из промышленно развитых районов с сильными его источниками, поэтому концентрации черного углерода были значительно выше. Повышенные концентрации были отмечены в пробах № 108, 109, 110, 111, обратные траектории воздушных масс, построенные по алгоритму NOAA [76], показывают, что атмосферный перенос осуществлялся из районов нефте- и газодобычи (факелы сжигания попутного газа) и промышленных районов Сибири [75].

Закключение.

Концентрации тяжелых металлов в составе аэрозолей в удаленных от суши районах находятся на фоновом уровне и резко возрастают вблизи суши при поступлении воздушных масс со стороны промышленных центров и районов нефте- и газодобычи.

Воздушный перенос Pb, Cd, Zn, Cu от антропогенных источников является основным путем поставки этих токсичных тяжелых металлов в морские экосистемы Балтийского, Северного Средиземного морей, многих заливов Северной Атлантики.

Поставка растворенного и взвешенного Pb, растворённых форм Cd и Zn в открытые района океана в несколько раз превышает их речной сток. В поставке в океан Cu, Ni и As вклад воздушного переноса и речного стока близки по величине.

Вклад аэрозольного материала в формирование состава вод Северного Ледовитого океана и его морей вполне сравним с вкладом речной взвеси (за пределами маргинальных фильтров), особенно для таких преимущественно антропогенных металлов как свинец и кадмий.

Аэрозоли оказывают существенное влияние на климат. Наиболее сильное воздействие на климат оказывают частицы черного углерода (сажи). Сажа также как и парниковые газы влияет на радиационные свойства атмосферы, приводит к снижению альбедо арктического снежно-ледового покрова, что может вызвать увеличение поставки тепла за счет солнечной радиации и оказать существенное влияние на климат Северного полушария в ближайшие десятилетия.

Благодарности.

Автор благодарен академику А.П. Лисицыну за поддержку и ценные советы.

Список используемых источников:

1. Фукс Н.А. Механика аэрозолей. М.: Изд-во Академии наук, 1955. 352 с.
2. Junge C.E. Air chemistry and radioactivity. New York, London: Academic Press, 1963. 382 p.
3. Finlayson-Pitts B.J., Pitts J.N., Jr. Atmospheric chemistry: Fundamentals and experimental techniques. New York: Wiley, 1986. 1098 p.
4. Brimblecombe P. Air composition and chemistry. Cambridge: Cambridge University Press, 1996. 253 p.
5. Кондратьев К.Я. Атмосферный аэрозоль как климатообразующий компонент атмосферы. 1. Свойства аэрозоля различных типов // Оптика атмосферы и океана. 2004. Т. 17. № 1. С. 1–20.
6. Кондратьев К.Я., Излев Л.С., Крапивин В.Ф. Свойства, процессы образования и последствия воздействий атмосферного аэрозоля: от нано- до глобальных масштабов. СПб.: ВВМ, 2007. 860 с.
7. Darwin C. An account of the fine dust which often falls on vessels in the Atlantic Ocean // Quarterly Journal of the Geological Society of London. 1845. V. 2. P. 26–30.
8. Дарвин Ч. Путешествие вокруг света на корабле «Бигль». М.: Эксмо, 2011. 480 с.
9. Лисицын А.П. Атмосферная и водная взвесь как исходный материал для образования морских осадков // Тр. Ин-та океанологии АН СССР. 1955. Т. 13. С. 16–22.
10. Живаго В.Н., Богданов Ю.А. Эоловая взвесь над Атлантическим и Тихим океанами // Гидрофизические и гидрооптические исследования в Атлантическом и Тихом океанах. М.: Наука, 1974. С. 259–279.
11. Лисицын А.П. Осадкообразование в океанах. Количественное распределение осадочного материала. М.: Наука, 1974. 438 с.
12. Лисицын А.П. Процессы океанской седиментации. Литология и геохимия. М.: Наука, 1978. 392 с.
13. Лисицын А.П. Аридная седиментация в Мировом океане. Рассеянное осадочное вещество атмосферы // Геология и геофизика. 2011. Т. 52. № 10. С. 1398–1439.
14. Лисицын А.П. Современные представления об осадкообразовании в океанах и морях. Океан как природный самописец взаимодействия геосфер Земли // Мировой океан. Т. 2. Физика, химия, и биология океана. Осадкообразование в океане и взаимодействие геосфер Земли. М.: Научный мир, 2014. С. 331–571.
15. Емельянов Е.М., Кооль Л.В. Перенос пыли и её роль в процессе осадкообразования в Атлантическом океане // Литология и полезные ископаемые. 1979. № 2. С. 3–15.
16. Миклишанский А.З., Серова В.В., Тамбиев С.Б. Черты геохимии эоловой взвеси Индийского океана // Геохимия. 1985. № 12. С. 1758–1765.
17. Лукашин В.Н., Шевченко В.П., Лисицын А.П., Серова В.В., Иванов Г.В. Распределение, вещественный и химический состав аэрозолей над западной частью Тихого океана // Океанология. 1996. Т. 36. № 2. С. 288–298.
18. Ключевиткин А.А., Лукашин В.Н., Новигатский А.Н., Исаева А.Б., Серова В.В. Минеральные аэрозоли, их концентрация, состав и потоки на океанскую поверхность // Океанология. 2004. Т. 44. № 5. С. 756–767.

19. Шевченко В.П. Влияние аэрозолей на среду и морское осадконакопление в Арктике. М.: Наука, 2006. 226 с.
20. Лукашин В.Н., Новизгатский А.Н. О химическом составе аэрозолей в приподном слое атмосферы Среднего Каспия зимой и осенью 2005 г. // *Океанология*. 2013. Т. 53. № 6. С. 813–824.
21. Немировская И.А., Новизгатский А.Н., Реджепова З.Ю. Атлантика: обмен вещества на границе вода–воздух // *Природа*. 2016. № 11. С. 56–63.
22. Delany A.C., Delany A.C., Parkin D.W., Griffin J.J., Goldberg E.D., Reimann B.E.F. Airborne dust collected at Barbados // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1967. V. 31. P. 885–909.
23. Chester R., Elderfield H., Griffin J., Johnson L.R., Padham R.C. Eolian dust along the eastern margins of the Atlantic Ocean // *Marine Geology*. 1972. V. 13. № 2. P. 91–105.
24. Windom H.L. Eolian contribution to marine sediments // *Journal of Sedimentary Petrology*. 1975. V. 45. P. 520–529.
25. Савенко В.С. Средний элементарный химический состав океанского аэрозоля // *Доклады Академии наук СССР*. 1988. Т. 299. № 2. С. 465–468.
26. Duce R.A., Liss P.S., Merrill J.T., Atlas E.L., Buat-Menard P., Hicks B.B., Miller J.M., Prospero J.M., Arimoto R., Church T., Ellis W., Galloway J.N., Hansen L., Jickells T.D., Knap A.H., Reinhardt K.H., Schneider B., Soudine A., Tokos J.J., Tsunogai S., Wollast R., Zhou M. The atmospheric input of trace species to the World Ocean // *Global Biogeochemical Cycles*. 1991. V. 5. № 3. P. 193–259.
27. Rädlein N., Heumann K.G. Trace analysis of heavy metals in aerosols over the Atlantic Ocean from Antarctica to Europe // *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*. 1992. V. 48. P. 127–150.
28. Arimoto R., Duce R.A., Ray B.J., Ellis Jr. W.G., Cullen J.D., Merrill J.T. Trace elements in the atmosphere over the North Atlantic // *Journal of Geophysical Research*. 1995. V. 100. № D1. P. 1199–1213.
29. Сакерин С.М., Кабанов Д.М., Панченко М.В., Польшин В.В. О широтной зависимости и взаимосвязях характеристик аэрозоля в атмосфере Южной Атлантики // *Оптика атмосферы и океана*. 2006. Т. 19. № 7. С. 611–621.
30. Аникиев В.В., Колесов Г.М. Природные факторы, определяющие временную изменчивость основного химического состава минеральных аэрозолей над Северным Каспием // *Геохимия*. 2008. № 12. С. 1304–1321.
31. Лапшин В.Б., Чичаева М.А., Матвеева И.С., Чичаев А.Н., Колесников М.В., Сыроешкин А.В. Тяжелые металлы, алюминий и мышьяк в аэрозолях Атлантического, Северного Ледовитого океанов и европейских морей России // *Исследовано в России*. 2010. Т. 14. С. 393–403.
32. Гончарук В.В., Лапшин В.Б., Чичаева М.А., Матвеева И.С., Самсоны-Тодоров А.О., Таранов В.В., Сыроешкин А.В. Тяжелые металлы, алюминий и мышьяк в аэрозолях Мирового океана // *Химия и технология воды*. 2012. Т. 34. № 1. С. 3–17.
33. Guieu C., Shevchenko V.P. Dust in the Ocean // *Encyclopedia of Marine Geosciences / Harff J., Meschede M., Petersen S., Thiede J. (Eds.)*. Dordrecht: Springer Science+Business Media, 2016. P. 203–208.
34. Луцицын А.П. Маргинальный фильтр океанов // *Океанология*. 1994. Т. 34. № 5. С. 735–747.
35. Hacisalihoglu G., Eliyakut F., Olmez I., Balkas T.I., Tuncel G. Chemical composition of particles in the Black Sea atmosphere // *Atmospheric Environment*. V. 26A. № 17. P. 3207–3218.
36. Guieu C., Chester R., Nimmo M., Martin J.-M., Guerzoni S., Nikolas E., Mateu J., Keyse S. Atmospheric input of dissolved and particulate metals to the northwestern Mediterranean // *Deep-Sea Research II*. 1997. V. 44. № 3–4. P. 855–674.
37. Injuk J., Van Grieken R., De Leeuw G. Deposition of atmospheric trace elements into the North Sea: coastal, ship, platform measurements and model predictions // *Atmospheric Environment*. 1998. V. 32. № 17. P. 3011–3025.
38. Guerzoni S., Chester R., Dulac F., Herut B., Loje-Pilot M.-D., Measures C., Migon C., Molinaroli E., Moulin C., Rossini P., Saydam C., Soudine A., Ziveri P. The role of atmospheric deposition in the biogeochemistry of the Mediterranean Sea // *Progress in Oceanography*. 1999. V. 44. P. 147–190.
39. Kim G., Scudlark J.R., Church T.M. Atmospheric wet deposition of trace elements to Chesapeake and Delaware Bays // *Atmospheric Environment*. 2000. V. 34. P. 3437–3444.
40. Schneider B., Ceburnis D., Marks R., Munthe J., Petersen G., Sofiev M. Atmospheric Pb and Cd input into the Baltic Sea: a new estimate based on measurements // *Marine Chemistry*. 2000. V. 71. P. 297–307.
41. Сыроешкин А.В., Шокина О.Н., Исаков В.А., Матвеева И.С., Коршенко А.Н. Химическое загрязнение восточной части Финского залива и проблема токсичности морских аэрозолей // *Исследования морей и океанов*. СПб.: Гидрометеоздат, 2002. Вып. 208. С. 260–276.
42. Heimbürger L.-E., Migon C., Dufour A., Chiffolleau J.-F., Cossa D. Trace metal concentrations in the North-western Mediterranean atmospheric aerosol between 1986 and 2008: seasonal patterns and decadal trends // *The Science of the Total Environment*. 2010. V. 408. P. 2629–2638.

43. Zhou M., Lu N., Miller J., Parungo F.P., Nagamoto C., Yang S.-J. Characterization of atmospheric aerosols and of suspended particles in seawater in the western Pacific Ocean // *Journal of Geophysical Research*. D. 1992. V. 97. № 7. P. 7553–7567.
44. Лавренчик В.Н. Глобальные выпадения продуктов ядерных взрывов. М.: Атомиздат, 1965. 170 с.
45. Raatz W.E. The climatology and meteorology of arctic air pollution // *Pollution of the Arctic Atmosphere*. London, New York: Elsevier, 1991. P. 13–42.
46. Rahn K.A. Atmospheric, riverine and oceanic sources of seven trace constituents to the Arctic Ocean // *Atmospheric Environment*. 1981. V. 15. № 8. P. 1507–1516.
47. Maenhaut W., Cornille P., Pacyna J.M., Vitols V. Trace element composition and origin of the atmospheric aerosol in the Norwegian Arctic // *Atmospheric Environment*. 1989. V. 23. № 11. P. 2551–2569.
48. Maenhaut W., Ducstel G., Leck C., Nilsson E.D., Heintzenberg J. Multi-elemental composition and sources of the high Arctic atmospheric aerosol during summer and autumn // *Tellus*. B. 1996. V. 48. P. 300–321.
49. Pacyna J.M. Chemical tracers of the origins of arctic air pollution // *Pollution of the Arctic atmosphere / Srurges W.T. (Ed.)*. London, New York: Elsevier, 1991. P. 97–122.
50. Виноградова А.А., Малков И.П., Полиссар А.В., Храмов Н.Н. Элементный состав приземного атмосферного аэрозоля арктических районов России // *Известия АН. Физика атмосферы и океана*. 1993. Т.29. № 2. С. 164–172.
51. Виноградова А.А., Максименков Л.О., Погарский Ф.А. Атмосферный перенос антропогенных тяжелых металлов с территории Кольского полуострова на поверхность Белого и Баренцева морей // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2008. Т. 44. № 6. С. 812–821.
52. Shevchenko V.P., Lisitzin A.P., Kuptzov V.M., Ivanov G.I., Lukashin V.N., Martin J.M., Rusakov V.Yu., Safarova S.A., Serova V.V., Van Grieken R., Van Malderen H. Composition of aerosols over the Laptev, Kara, Barents, Greenland and Norwegian seas // *Berichte zur Polarforschung*. 1995. V. 176. P. 7–16.
53. Шевченко В.П., Виноградова А.А., Иванов Г.И., Лисицын А.П., Серова В.В. Распределение и состав аэрозолей Западной Арктики // *Доклады Академии наук*. 1997. Т. 355. № 5. С. 673–676.
54. Шевченко В.П., Лисицын А.П., Купцов В.М., Ван-Малдерен Г., Мартэн Ж.-М., Ван-Грикен Р., Хуан В.В. Состав аэрозолей в приземном слое атмосферы над морями западного сектора Российской Арктики // *Океанология*. 1999. № 1. С. 142–151.
55. Шевченко В.П., Штайн Р., Виноградова А.А., Бергхолтер У., Айкен Х., Колачек Й., Лисицын А.П., Смирнов В.В., Иванов Г.И. Элементный состав аэрозолей в приземном слое атмосферы над морем Лаптевых в июле–сентябре 1995 г. // *Океанология*. 2004. Т. 44. № 4. С. 616–624.
56. Barrie L.A. Occurrences and trends of pollution in the Arctic troposphere // *Chemical exchange between the atmosphere and polar snow / Wolff E.W., Bales R.C. (Eds.)*. Berlin, Heidelberg: Springer, 1996. P. 93–129.
57. Голубева Н.И., Бурцева Л.В., Матишов Г.Г., Ильин Г.В. Результаты измерений тяжелых металлов в атмосферных аэрозолях в открытых районах арктических морей в 2009–2010 гг. // *Доклады Академии наук*. 2013. Т. 453. № 1. С. 72–75.
58. Стародымова Д.П., Шевченко В.П., Сивонен В.П., Сивонен В.В. Вещественный и элементный состав приземного аэрозоля северо-западного побережья Кандалакшского залива Белого моря // *Оптика атмосферы и океана*. 2016. Т. 29. № 6. С. 488–492.
59. Шевченко В.П. Аэрозоли – влияние на осадконакопление и условия среды в Арктике: диссертация на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук. М., 2000. 213 с.
60. Shevchenko V. The influence of aerosols on the oceanic sedimentation and environmental conditions in the Arctic // *Berichte zur Polar- und Meeresforschung*. 2003. No. 464. 149 p.
61. Shevchenko V. Aerosols over the Russian Arctic seas // *Seabed morphology of the Russian Arctic shelf / Nikiforov S. (Ed.)*. New York: Nova Science Publishers, Inc., 2010. P. 87–92.
62. Shevchenko V., Lisitzin A., Vinogradova A., Stein R. Heavy metals in aerosols over the seas of the Russian Arctic // *The Science of the Total Environment*. 2003. V. 306. P. 11–25.
63. Виноградова А.А., Шевченко В.П. Роль атмосферных аэрозолей в загрязнении Северного Ледовитого океана и его морей // *Оптика атмосферы и океана*. 2005. Т. 18. № 5–6. С. 387–392.
64. Kadko D., Galfond B., Landing W.M., Shelley R.U. Determining the pathways, fate, and flux of atmospherically derived trace elements in the Arctic ocean/ice system // *Marine Chemistry*. V. 182. P. 38–50.
65. Виноградова А.А., Максименков Л.О., Погарский Ф.А. Промышленные комплексы Заполярья – источники антропогенных тяжёлых металлов в окружающей среде Российской Арктики // *Изменение окружающей среды и климата: природные и связанные с ними техногенные катастрофы. Т. III. Часть II. Природные процессы в полярных областях Земли. Отв. ред. В.М. Котляков. М.: ИГ РАН, ИФЗ РАН, 2008. С. 193–203.*
66. Shevchenko V.P., Vinogradova A.A., Lisitzin A.P., Novigatsky A.N., Panchenko M.V., Pol'kin V.V. Aeolian and ice transport of matter (including pollutants) in the Arctic // *Implications and Consequences of Anthropogenic*

- Pollution in Polar Environments. From Pole to Pole / R. Kallenborn (editor). Berlin, Heidelberg: Springer, 2016. P. 59–73.*
67. Quinn P.K., Bates T.S., Baum E., Doubleday N., Fiore A.M., Flanner M., Fridlind A., Garrett T.J., Koch D., Menon S., Shindell D., Stohl A., Warren S.G. *Short-lived pollutants in the Arctic: their climate impact and possible mitigation strategies // Atmospheric Chemistry and Physics. 2008. V. 8. P. 1723–1735.*
68. Hansen J., Nazarenko L. *Soot climate forcing via snow and ice albedos // Proceedings of the National Academy of Sciences. 2004. V. 101. P. 423–428.*
69. Полькин В.В., Панченко М.В., Грищенко И.В., Коробов В.Б., Лисицын А.П., Шевченко В.П. *Исследования дисперсного состава приводного аэрозоля Белого моря в конце летнего сезона 2007 г. // Оптика атмосферы и океана. 2008. Т. 21. № 10. С. 836–840.*
70. Копейкин В.М., Репина И.А., Гречко Е.И., Огородников Б.И. *Измерение содержания сажевого аэрозоля над водной поверхностью в Южном и Северном полушариях // Оптика атмосферы и океана. 2010. Т. 23. № 6. С. 444–450.*
71. Голобокова Л.П., Полькин В.В., Кабанов Д.М., Терпугова С.А., Чернов Д.Г., Чипанина Е.В., Ходжер Т.В., Нецветаева О.Г., Панченко М.В., Сакерин С.М. *Исследования атмосферного аэрозоля в Арктических районах России // Лед и снег. 2013. № 2 (122). С. 129–136.*
72. Stohl A., Klimont Z., Eckhardt S., Kupiainen K., Shevchenko V.P., Kopeikin V.M., Novigatsky A.N. *Black carbon in the Arctic: the underestimated role of gas flaring and residential combustion emissions // Atmospheric Chemistry and Physics. 2013. V. 13. P. 8833–8855.*
73. Sakerin S.M., Bobrikov A.A., Bukin O.A., Golobokova L.P., Pol'kin Vas.V., Pol'kin Vik.V., Shmirko K.A., Kabanov D.M., Khodzher T.V., Onischuk N.A., Pavlov A.N., Potemkin V.L., Radionov V.F. *On measurements of aerosol-gas composition of the atmosphere during two expeditions in 2013 along the Northern Sea Route // Atmospheric Chemistry and Physics. 2015. V. 15. P. 12413–12443.*
74. Шевченко В.П., Стародымова Д.П., Виноградова А.А., Лисицын А.П., Макаров В.И., Попова С.А., Сивонен В.В., Сивонен В.П. *Элементный и органический углерод в атмосферном аэрозоле над северо-западным побережьем Кандалакшского залива Белого моря // Доклады Академии наук. 2015. Т. 461. № 1. С. 70–74.*
75. Shevchenko V.P., Kopeikin V.M., Evangeliou N., Lisitzin A.P., Novigatsky A.N., Pankratova N.V., Starodymova D.P., Stohl A., Thompson R. *Atmospheric black carbon over the North Atlantic and the Russian Arctic seas in summer – autumn time // Химия в интересах устойчивого развития. 2016. Т. 24. № 4. С. 441–446.*
76. Draxler R.R., Rolph G.D. *HYSPLIT (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory). Silver Spring (MD): NOAA Air Resources Lab., 2003. URL: www.arl.noaa.gov/ready/hysplit4.html*

© 2016, Шевченко В.П.

Роль аэрозолей в загрязнении морей и океанов
тяжелыми металлами и климатических изменениях

© 2016, Shevchenko V.P.

The role of aerosols in pollution of seas and oceans by
heavy metals and in climate change