

СНЕЖНЫЙ ПОКРОВ И СНЕЖНЫЕ ЛАВИНЫ

УДК 551.577

<https://doi.org/10.15356/2076-6734-2019-3-386>

Нерастворимые фракции аэрозолей и тяжёлых металлов в свежеснегавшем снеге на северо-западе Кольского полуострова в 2018 г.

© 2019 г. М.В. Митяев^{1*}, М.В. Герасимова¹, И.В. Рыжик^{1,2}, Т.Г. Ишкулова¹¹Мурманский морской биологический институт Кольского научного центра РАН, Мурманск, Россия;²Мурманский арктический государственный университет, Мурманск, Россия

*mityaev@mmbi.info

Insoluble fractions of aerosols and heavy metals in fresh snow in the North-West of the Kola Peninsula in 2018

M.V. Mityaev^{1*}, M.V. Gerasimova¹, I.V. Ryzhik^{1,2}, T.G. Ishkulova¹¹Murmansk marine biological institute Kola Science Center Russian Academy of Sciences, Murmansk, Russia;²Murmansk Arctic State University, Murmansk, Russia

*mityaev@mmbi.info

Received October 25, 2018 / Revised February 2, 2019 / Accepted June 13, 2019

Keywords: aerosol concentration, aerosol flow, forest-tundra, fresh snow, Kola Peninsula, northern taiga, tundra.

Summary

As a result of studies of newly fallen snow in the North of the Kola Peninsula, it was found that from January to May 2018 its density amounted, on the average, to $0.160 \pm 0.006 \text{ g/cm}^3$ ($n = 82$), and pH of melted snow water – 6.87 ± 0.14 ($n = 47$). Neutral and slightly alkaline reaction of snow water impedes the mobility of heavy metals in the insoluble fraction of aerosols. In loose fresh snow (density less than 0.2 g/cm^3) the content of solid aerosols increases as the snow density grows. The average concentration of solid aerosol particles in freshly fallen snow is $4.04 \pm 0.24 \text{ mg/l}$ ($n = 47$). Over the winter period of 2018 (120 days), about 1.85–2.37 thousand tons of aerosol substance precipitated on the underlying surface of the area under investigation. The daily deposition of aerosols averaged $1.03\text{--}1.33 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$, and together with solid precipitation, $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$: Zn – 12.5–14.2, Cu – 2.2–2.5, Pb – 0.58–0.66, Cd – 0.31–0.42. According to the results of our researches, two impact areas were previously identified, both allocated to large regional centers. The Murmansk coast is divided into three background areas, each of which corresponds to its natural landscape complex.

Citation: Mityaev M.V., Gerasimova M.V., Ryzhik I.V., Ishkulova T.G. Insoluble fractions of aerosols and heavy metals in fresh snow in the North-West of the Kola Peninsula in 2018. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2019. 59 (3): 307–318. [In Russian]. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2019-3-386>.

Поступила 25 октября 2018 г. / После доработки 2 февраля 2019 г. / Принята к печати 13 июня 2019 г.

Ключевые слова: Кольский полуостров, концентрация аэрозолей, лесотундра, поток аэрозолей, свежеснегавший снег, северная тайга, тундра.

С января по май 2018 г. на северо-западе Кольского полуострова проведено исследование концентраций твёрдых нерастворимых частиц в свежеснегавшем снеге, а также потока твёрдых аэрозолей на поверхность земли в зимний период. Средняя концентрация твёрдых нерастворимых частиц в свежеснегавшем снеге составляет $4,04 \pm 0,24 \text{ мг/л}$ ($n = 47$), что выше фоновых значений для западной Арктики. Поток твёрдых аэрозольных частиц в среднем равен $2,10 \pm 0,09 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-2}$ за один снегопад.

Введение

Снег вымывает из атмосферы твёрдые и растворённые вещества [1, 2]. Нерастворимые аэрозоли в снеге характеризуют зимнюю атмосферу, где главное значение в поставке веще-

ства отводится дальнему и сверхдальнему переносам [3, 4]. При отборе свежеснегавшего снега со скованной морозом поверхности можно не только определить концентрацию аэрозольного материала, но и получить надёжную количественную характеристику поступления твёрдых

аэрозолей на единицу площади земной поверхности, т.е. оценить вертикальный поток аэрозолей, в том числе и загрязняющих веществ.

Высокоширотное положение Кольского полуострова обуславливает выпадение твёрдых атмосферных осадков 180–200 дней в году [5]. На природный уровень концентраций вещества в снежном покрове накладываются выбросы промышленных и городских агломераций как Мурманской области, так и более отдалённых районов [1]. В снежном покрове наблюдается значительная изменчивость в содержании нерастворимых частиц и тяжёлых металлов. Наиболее загрязнён снежный покров в окрестностях центров цветной металлургии, переработки апатит-нефелинового сырья и крупных городов [6–9]. Считается, что снежный покров Кольского полуострова испытывает повышенные антропогенные нагрузки, в нём накапливаются и перераспределяются токсичные химические соединения и элементы, в дальнейшем влияющие на природные комплексы полуострова [1].

Исследования нерастворимых частиц в снежном покрове Арктики активно ведутся как российскими [1, 6, 10–12], так и иностранными исследователями [8, 13–15]. Однако концентрации твёрдых аэрозолей в свежеснеге на севере Кольского полуострова ранее не изучались. В последние десятилетия особое внимание

учёных и широкой общественности приковано к атмосфере — источнику переноса различного рода загрязняющих веществ. Особенно это актуально в Арктическом регионе, чутко реагирующем на антропогенное загрязнение окружающей среды [6, 16, 17]. Цель нашей работы — проведение исследований поставки твёрдых аэрозолей и тяжёлых металлов в зимний период 2018 г. на север Кольского полуострова.

Материалы и методы

Со 2 января по 1 мая 2018 г. в ходе полевых работ на Мурманском побережье были отобраны пробы свежеснега на 16 станциях (рис. 1) вдоль четырёх автомобильных магистралей: Мурманск — Серебрянская ГЭС (до пос. Турманный на востоке), Мурманск — Никель (до г. Полярный на северо-западе), Мурманск — Лота (до устья р. Лота на западе) и Мурманск — Санкт-Петербург (до р. Китца на юге). Снег отбирался на следующий день после снегопада (толщина свежеснега составляла более 0,3 см) на расстоянии не менее 500 м от автомобильных дорог против ветра чистым пробоотборником из пищевой нержавеющей стали в плотные полиэтиленовые пакеты. Чтобы исключить попадание уплотнённого снега, отбирался только верх-



Рис. 1. Карта-схема станций наблюдений, январь–май 2018 г.

Станции наблюдения: 1 — на автономных ландшафтах; 2 — на аккумулятивных ландшафтах. Цифры на схеме — станции: 1 — р. Воронья, 2 — р. Эйч, 3 — р. Териберка, 4 — Канинтъявр, 5 — ручей Кильдинский, 6 — р. Китца, 7 — г. Мурманск, 8 — р. Тулома, 9 — 55-й км Туломского водохранилища, 10 — 90-й км Туломского водохранилища, 11 — 120-й км Туломского водохранилища, 12 — р. Акким, 13 — р. Ура, 14 — р. Западная Лица, 15 — р. Титовка, 16 — р. Печенга

Fig. 1. Map-scheme of observation stations, January–May 2018.

Observation stations: 1 — on autonomous landscapes; 2 — on accumulative landscapes. The numbers in the diagram — stations: 1 — Voron'ya, 2 — Ehjinch, 3 — Teriberka, 4 — Kanint'yavr, 5 — Kildinskiy, 6 — Kitca, 7 — Murmansk, 8 — Tuloma, 9 — 55 km Tulom reservoir, 10 — 90 km Tulom reservoir, 11 — 120 km Tulom reservoir, 12 — Akkim, 13 — Ura, 14 — West Lica, 15 — Titovka, 16 — Pechenga

ний слой свежего снега толщиной 1–3 мм. После доставки проб снега в лабораторию их помещали в холодильник и хранили при температуре $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ до обработки. Плотность свежевыпавшего снега определяли методом взвешивания. Проба снега вырезалась пластиковым кольцом диаметром 10 см, которое погружали в снежный покров на 0,5–1 см (если толщина свежевыпавшего снега была менее 0,5 см, то плотность снега не определялась). На каждой станции измерение плотности снега проводили в начале и конце площадки, с которой отбиралась проба.

В лаборатории пробы снега растапливали при комнатной температуре. Талую воду фильтровали через предварительно взвешенные ядерные лавсановые фильтры с диаметром рабочей поверхности 47 мм и диаметром пор 0,45 мкм. Фильтры с аэрозольным веществом высушивали в термостате при температуре 50–60 $^{\circ}\text{C}$ до полного высыхания и повторно взвешивали на электронных весах с точностью до 0,00005 г. После взвешивания для каждой пробы вычисляли среднюю массовую концентрацию нерастворимых частиц как отношение массы аэрозольных частиц на фильтре к объёму профильтрованной талой снеговой воды. Параллельно определялся рН талой воды стационарным рН-метром с точностью до 0,01 рН. Часть талой нефилтрованной воды объёмом 100 мл отбирали в чистую пластиковую ёмкость для определения концентраций ионов Zn, Pb, Cu и Cd. Концентрации ионов анализировали на вольтамперометрическом анализаторе TA-Lab (с ртутным электродом, номер в Госреестре 44076-10), точность определения $\pm 20\%$. Полученные концентрации пересчитывали на единицу массы сухого вещества. Под микроскопом Zeiss Axio Imager D2 и бинокулярным микроскопом МБС-10 просматривали ядерные фильтры для определения вещественного состава аэрозолей (минеральные, биогенные и техногенные частицы).

Результаты и их обсуждение

Плотность свежевыпавшего снега. Количество нерастворимых частиц в снеге традиционно представляют в относительных единицах (мг/л, нг/г, ppm и др.) – в пересчёте на объём талой воды [9]. Однако это не всегда оправдано, так как из одинаковых объёмов снега с разной плот-

ностью будет получен разный объём талой воды. Как известно, плотность свежевыпавшего снега зависит от кристаллической структуры снежинок и влажности снега, а также от температуры и влажности воздуха [18].

Плотность свежевыпавшего снега на севере Кольского полуострова в январе–мае 2018 г. изменялась от 0,087 до 0,288 г/см³ и в среднем составляла $0,160 \pm 0,006$ г/см³ ($n = 82$). Таким образом, 1 кг свежевыпавшего снега занимает объём от 3,5 до 11,5 дм³, а из 1 дм³ свежевыпавшего снега может быть получено 87–288 мл пресной воды (т.е. объёмы талой воды отличаются более чем в три раза). Следовательно, при одинаковых содержаниях твёрдых частиц концентрация аэрозолей будет существенно различаться. Вероятно, необходимы дополнительные исследования для выработки единых подходов и относительных единиц измерения концентраций твёрдых аэрозолей.

В зимний период 2018 г. на севере Кольского полуострова плотный (0,205–0,288 г/см³) свежевыпавший снег отмечался на семи станциях: в январе – в 10 км на восток от г. Мурманск, в феврале – в долинах рек Печенга и Ура, в апреле – на всей восточной части исследуемого района (реки Канинтъявр, Териберка, Эйч, Воронья). Сухой пушистый (менее 0,130 г/см³) свежевыпавший снег выпадал в 24 случаях во всех точках исследуемого района. На десяти станциях наблюдался влажный пушистый свежевыпавший снег (плотность 0,14–0,20 г/см³). Ещё на шести станциях определить плотность свежевыпавшего снега не удалось из-за незначительной толщины снежного покрова.

Водородный показатель свежевыпавшего снега. Механизмы поступления химических веществ, в том числе тяжёлых металлов, от техногенных источников в компоненты экосистем различны. Одни из главных – аэротехногенные выбросы в атмосферу и выпадение с атмосферными осадками. Важнейшая проблема при исследовании атмосферных осадков состоит в выявлении степени их кислотности. Повышение кислотности способствует мобилизации тяжёлых металлов и их проникновению в различные среды.

В зимний период 2018 г. рН талой снеговой воды на севере Кольского полуострова изменялся от 5,70 до 8,53 при среднем значении $6,87 \pm 0,14$ ($n = 47$). Среднее значение рН снеговой воды близко к нейтральному. Достоверные

Таблица 1. Концентрация аэрозолей в свежеснеге (пересчёт на талую воду) с января по май, мг/л (числитель) и поток твёрдых аэрозолей со свежеснегом с января по май, мг·м⁻² (знаменатель)

Район	Северная широта	Восточная долгота	Январь*	Февраль	Март	Апрель	Май		
Р. Воронья	68°49.157'	35°33.726'	2,96/1,50	3,77/2,39	5,57/2,73	1,01/1,17	2,16/1,52		
Р. Эйнч	68°48.754'	35°21.172'	1,67/0,46	4,27/2,61	4,23/3,06	1,89/2,39	4,41/1,32		
Р. Териберка	68°53.489'	34°21.271'	4,72/2,55	4,93/2,11	2,03/1,45	1,56/1,28	1,90/1,09		
Р. Канингъявр	68°52.446'	34°12.130'	1,29/0,40	2,93/1,45	1,72/1,07	1,51/1,23	2,14/0,91		
Ручей Кильдинский	68°53.204'	33°17.853'	3,16/0,73	10,89/4,06	5,02/2,96	2,32/2,17	3,87/2,43		
Р. Ура	69°08.058'	32°31.561'	–	2,53/0,84	3,34/1,83	–	–		
Р. Западная Лица	69°21.235'	32°08.764'		5,17/1,19	1,17/0,67				
Р. Титовка	69°28.785'	31°49.746'		4,02/0,75	3,30/1,78				
Р. Печенга	69°32.173'	31°11.430'		38,16/2,90	8,34/4,73				
Г. Мурманск*	68°56.549'	33°03.357'		6,97/2,17	40,51/13,28			6,03/2,28	4,15/2,17
Устье р. Тулома	68°48.036'	32°34.239'		–	5,76/2,11			–	–
55 км Туломского водохранилища*	68°40.714'	31°54.635'		4,03/1,50	2,82/1,72				
90 км Туломского водохранилища	68°41.828'	31°22.771'		5,14/2,09	1,99/1,61				
120 км Туломского водохранилища	68°43.110'	30°39.401'		5,26/2,22	2,72/2,06				
Р. Китца	68°37.936'	33°17.129'		–	–			4,73/2,89	3,14/2,78
Р. Акким	69°00.727'	30°22.301'	–		3,66/2,08	–			

*Автономные ландшафты. Прочерки – свежеснег отбирался только на химический состав.

различия в значениях рН талой снеговой воды наблюдались у западной и восточной частей территории. Несколько сдвинуты в щелочную сторону средние значения рН талой снеговой воды к западу от Кольского залива ($7,24 \pm 0,21$, $n = 16$) в лесотундровой зоне ($7,44 \pm 0,28$, $n = 8$) и в зоне северной тайги ($7,18 \pm 0,48$, $n = 8$). В то же время на востоке территории рН талой снеговой воды составил в среднем $6,65 \pm 0,24$ ($n = 20$) (за зоной влияния городских инфраструктур). В районах г. Мурманск, посёлков Североморск-3, Тулома, Лопарское значения рН в среднем составляли $6,77 \pm 0,22$ ($n = 11$), т.е. достоверно не отличались от значения рН восточного района. Хотя для всего севера Кольского полуострова твёрдые атмосферные осадки зимой 2018 г. по водородному показателю можно охарактеризовать как нейтральные. Повышенная щёлочность атмосферных осадков на западе территории, вероятно, связана с близостью незамерзающего моря, особенно в северо-западной части района. С чем связана высокая кислотность снега на востоке территории – не совсем понятно. В зоне же городского влияния этого района рН талой снеговой воды более высокий, несмотря на выбросы ТЭЦ, рыбоперерабатывающих, мусоросжигающих комплексов и работы автотранспор-

та. Таким образом, проведённые исследования реакции талой снеговой воды свидетельствуют о преобладании в атмосферных осадках щелочных компонентов над кислотными.

Концентрация твёрдых нерастворимых частиц в свежеснеге в январе–мае 2018 г. на севере Кольского полуострова изменялась от 1,01 до 40,51 мг/л (в среднем составляла $4,04 \pm 0,24$ мг/л, $n = 47$) (табл. 1). Это выше, чем фоновое содержание аэрозолей в снежном покрове Арктики (менее 3 мг/л [2, 9, 10, 19, 20]), но ниже, чем в импактных районах (более 10 мг/л [6, 9, 11, 13, 16]) (табл. 2). Фоновый диапазон концентраций твёрдых аэрозолей в свежеснеге на севере Кольского полуострова в зимний период 2018 г. составлял 1,9–8,5 мг/л.

Концентрация нерастворимых частиц в свежеснеге имеет трёхмодальное распределение; вероятно, моды указывают на разные источники аэрозольного материала. Первое модальное значение 1,15 мг/л можно отнести к фоновым содержаниям, которые отмечаются в снежном покрове отдалённых районов Арктики как результат дальнего или сверхдальнего переноса аэрозолей [2, 9]. Второе модальное значение 3,77 мг/л отражает местный региональный фон. Третье модальное значение 5,70 мг/л, веро-

Таблица 2. Среднее содержание элементов в талой снеговой воде, $\text{нг}\cdot\text{г}^{-1}$

Район	Zn	Cu	Pb	Cd	Источник
Фоновые районы Арктики*	7,01	0,771	0,397	0,240	[1, 9, 11, 12, 15, 17, 20, 22]
Кольский полуостров	16,9	24,1	0,981	0,116	[6, 9]
Города Норильск и Архангельск**	47,2	42,0	4,64	0,708	[6, 9, 11, 13, 16]
Север Кольского полуострова, январь–май 2018 г.:					Настоящая работа
средняя концентрация	34,5±8,03	6,75±2,82	1,63±0,63	0,992±0,325	
г. Мурманск и его окрестности	48,1±16,05	12,2±8,08	3,34±1,69	1,726±0,595	
Западный Мурман (тундра, лесотундра)	29,8±14,39	1,89±1,04	0,439±0,211	0,105±0,074	
Восточный Мурман (тундра, лесотундра)	26,2±14,10	5,54±3,04	1,006±0,595	0,481±0,325	

*Центральные и северные районы Гренландского, Баренцева, Карского морей и моря Лаптевых, центральная часть Северного Ледовитого океана. **Крупные северные промышленные центры.

ятно, связано с влиянием местных техногенных источников как промышленной (горно-перерабатывающей отрасли), так и городских инфраструктур (ТЭЦ, автотранспорт, железнодорожные перевозки и др.).

Исследования зависимости концентрации аэрозольных частиц от плотности свежевыпавшего снега позволили установить, что в талой снеговой воде из пушистого свежевыпавшего снега (плотность $< 0,20 \text{ г}/\text{см}^3$) прослеживается сильная прямая зависимость концентрации аэрозолей от плотности снега ($r = 0,742$, $n = 34$), а в талой снеговой воде из плотного и мокрого свежевыпавшего снега (плотность $> 0,20 \text{ г}/\text{см}^3$) зависимость обратная ($r = -0,904$, $n = 7$). Возможно несколько механизмов снижения концентрации аэрозольных частиц в мокром снеге. Прежде всего различия связаны с разным количеством талой воды, получаемой из снега разной плотности. Следовательно, чем плотнее снег, тем меньше концентрация аэрозолей, что и отражает коэффициент корреляции. Однако возможно, что в мокром снеге происходит вымывание твёрдых частиц как в ходе прохождения кристаллов снега через высокие слои атмосферы, так и после выпадения мокрого снега на земную поверхность – инфильтрация твёрдых частиц в нижележащий снежный покров. Также можно предположить, что снежная крупа, снежные иглы или градины характеризуются меньшей (по сравнению с сухим снегом из звёздочек, дендритов или пластинок) способностью захватывать твёрдые аэрозольные частицы из атмосферы.

По концентрации твёрдых нерастворимых частиц в свежевыпавшем снеге можно выделить два импактных и три фоновых района поступления аэрозольных частиц на земную поверхность

севера Кольского полуострова (рис. 2). *Импактные районы* пространственно приурочены к населённым пунктам Мурманской области. *Первый район* расположен в инфраструктуре устья реки Тулома и Кольского залива, включающей в себя населённые пункты (от пос. Лопарское до г. Североморск на восточной стороне Кольского залива и г. Полярный на западе Кольского залива), транспортные узлы (морские порты, железнодорожные и автомобильные пути), ТЭЦ, аэропорт. *Второй район* – это горно-промышленный комплекс и городские инфраструктуры на западе Мурманской области (в городах Никель, Печенга, Заполярный). В импактных районах основная масса аэрозольного вещества – техногенные продукты сферы сгорания, зола, угольная пыль. Концентрация твёрдых нерастворимых аэрозольных частиц в свежевыпавшем снеге в этих районах (включая устье р. Китца (пос. Лопарский), устье р. Тулома (пос. Тулома) в среднем составляла $10,22 \pm 3,48 \text{ мг}/\text{л}$ ($n = 14$), изменяясь от 2,32 до 40,51 мг/л.

Выделение *фоновых районов* достаточно условно, так как концентрации твёрдых нерастворимых частиц в них не имеют статистически достоверных отличий (см. рис. 2), но это разные природно-ландшафтные комплексы. *Северо-западный район* (средняя концентрация аэрозольного вещества $3,26 \pm 0,60 \text{ мг}/\text{л}$ талой воды, $n = 6$) объединяет тундры и лесотундры западной части Мурманского берега [5]. *Восточный район* (средняя концентрация аэрозольного вещества $2,83 \pm 0,32 \text{ мг}/\text{л}$ талой воды, $n = 20$) объединяет тундры и лесотундры восточной части Мурманского берега. *Западный район* (средняя концентрация аэрозольного вещества $3,66 \pm 0,51 \text{ мг}/\text{л}$ в свежевыпавшем снеге, $n = 7$) приурочен к ланд-

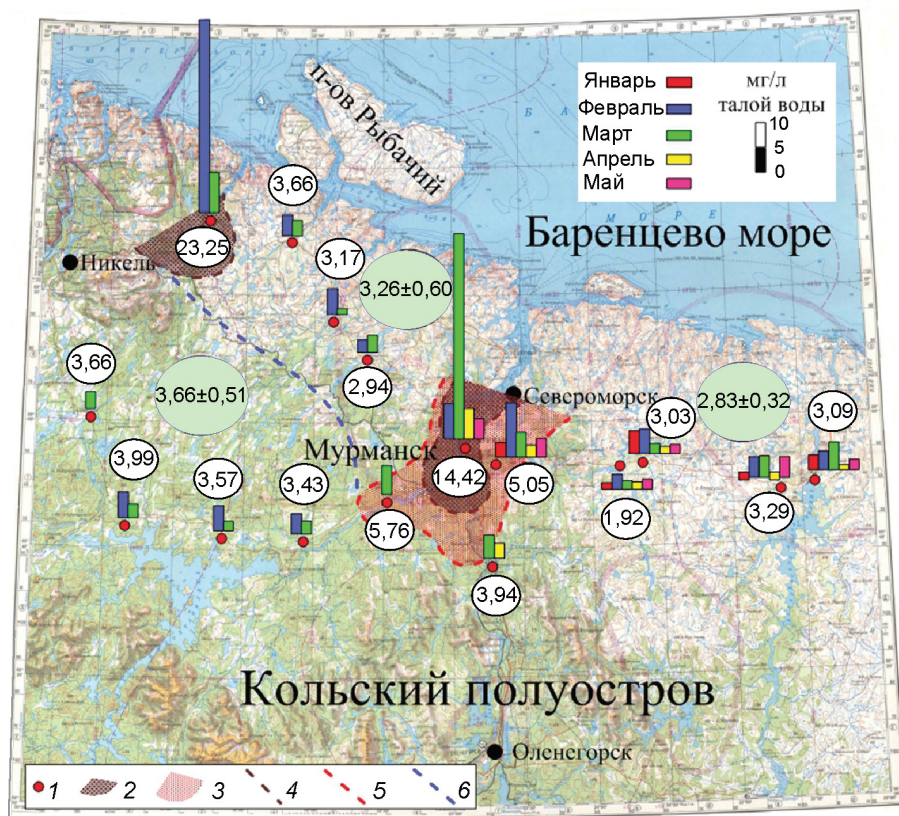


Рис. 2. Концентрация твёрдых аэрозолей в свежес выпавшем снеге, январь—май 2018 г.

1 – станции наблюдения; 2 – импактные районы; 3 – зона влияния импактного района; 4 – границы импактных районов; 5 – граница зоны влияния импактного района; 6 – граница фоновых районов. Цифры в кружках – среднее в точке наблюдения, цифры в зелёных кружках – среднее по районам (\pm доверительный интервал)

Fig. 2. Concentration of solid aerosols in freshly fallen snow, January—May 2018

1 – observation stations; 2 – impacted areas; 3 – zone of influence of the impact region; 4 – borders of impacted areas; 5 – boundary of the zone of influence of the impact region; 6 – border of background areas. The numbers in the circles are the average at the observation point, the numbers in the green circles are the average for the districts (\pm confidence interval)

шафтам северной тайги Центрально-Кольского блока [5]. Вещественный состав твёрдых нерастворимых частиц резко отличается от импактных районов, хотя повсеместно наблюдаются единичные сферы сгорания. Здесь преобладают мелкие неопределимые частицы (менее 1 мкм) различного цвета (жёлтых, зелёных, розовых тонов), а также белые (светло-серые) и прозрачные частицы. Встречаются волокна органического вещества и мельчайшие обломки минералов (в основном чешуйки слюд, изредка кварц и полевые шпаты).

Поток твёрдых аэрозольных частиц со свежес выпавшим снегом. Другой важный аспект в исследованиях свежес выпавшего снега – определение общего объёма аэрозольного вещества, поступающего на единицу площади за единицу времени. Традиционно такие расчёты делаются на квадратный метр в год (сутки), аналогично расчётам вертикальных потоков вещества в аквальных ландшафтах озёр и морей [3, 5, 19] по формуле

$$B = \frac{1}{n} \int_n W_i, \quad (1)$$

где B – поток аэрозолей за один снегопад, $\text{мг}\cdot\text{м}^{-2}$; n – число наблюдений за один снегопад;

W_i – поток аэрозолей в точке наблюдения, $\text{мг}\cdot\text{м}^{-2}$; $W_i = p_i/S_i$, p_i – количество аэрозольного вещества в точке наблюдения, S_i – площадь отбора свежес выпавшего снега.

Мы выполнили оценку данного показателя методом отнесения количества аэрозольного вещества в пробе к площади отбора свежес выпавшего снега за один снегопад (формула (1)) и фиксацию всех снегопадов по данным гидрометеослужбы Мурманской области. Так, со 2 января по 1 мая 2018 г. количество снегопадов в районе исследований изменялось от 82 до 94 (на разных участках территории), в среднем составляя 86 снегопадов за 120 суток. Поток твёрдых нерастворимых аэрозольных частиц изменялся от 0,40 до 13,28 $\text{мг}\cdot\text{м}^{-2}$ за один снегопад (см. табл. 1, рис. 3), в среднем составляя $2,10\pm 0,09 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-2}$ ($n = 47$). Поток нерастворимых аэрозольных частиц имеет одномодальное распределение с модой, близкой к математическому ожиданию среднего, – 2,24 $\text{мг}\cdot\text{м}^{-2}$ за один снегопад.

В выделенных ранее импактных районах вертикальный поток аэрозольного вещества изменялся от 0,73 до 13,28 $\text{мг}\cdot\text{м}^{-2}$, в среднем составляя $3,40\pm 0,83 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-2}$ ($n = 14$) за один снегопад. В вос-

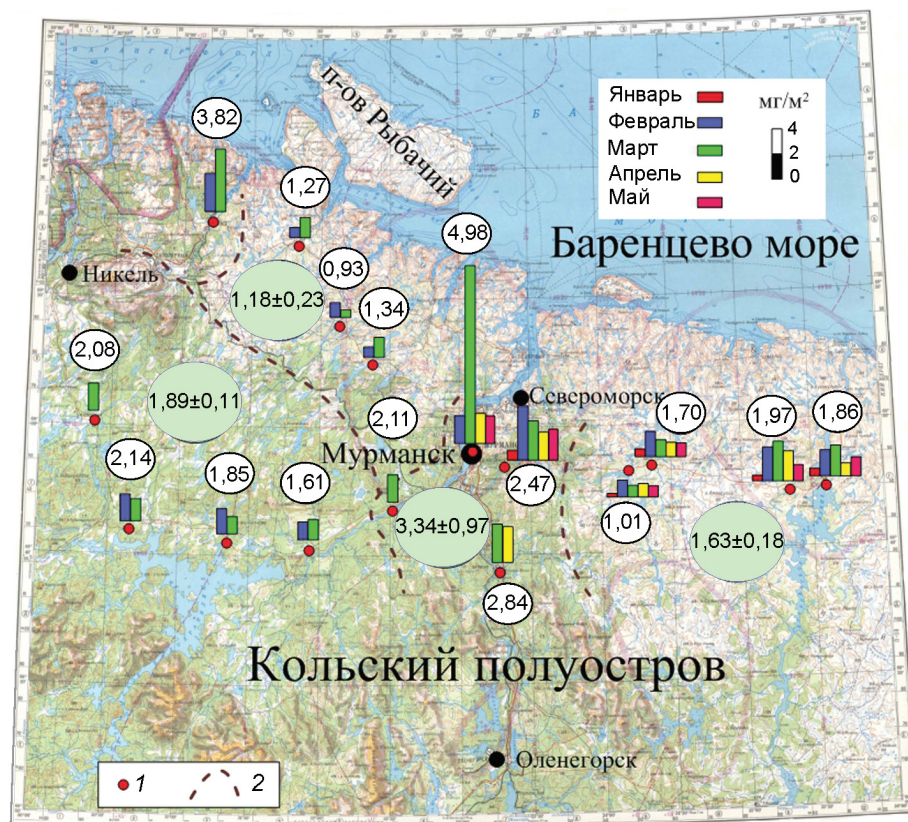


Рис. 3. Вертикальный поток твёрдых аэрозолей на поверхность земли со свежеснегавшим снегом, январь–май 2018 г.

1 – станции наблюдения; 2 – границы районов; остальные усл. обозначения см. рис. 2

Fig. 3. Vertical flow of solid aerosols to the ground with fresh snow, January–May 2018

1 – observation stations; 2 – border areas; see Fig. 2

точном фоновом районе этот показатель в среднем равен $1,63 \pm 0,18 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2}$ (от 0,40 до $3,06 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2}$ ($n = 20$)), в северо-западном – $1,18 \pm 0,23 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2}$ (от 0,67 до $1,83 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2}$ ($n = 6$)), в западном – $1,89 \pm 0,11 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2}$ (от 1,50 до $2,22 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2}$ ($n = 7$)). По этому показателю северо-таёжный ландшафт достоверно отличается от расположенных севернее тундровых и лесотундровых районов западной части Мурманского берега. Расчёт общего потока аэрозольных частиц на севере Кольского полуострова даёт оценку в $124\text{--}159 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2}$ (в разных районах исследования) за период с 2 января по 1 мая 2018 г. (120 суток). Таким образом, поток аэрозолей составляет $1,03\text{--}1,33 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$, что сопоставимо с данными В.П. Шевченко с соавторами [1, 21], оценившими вертикальный поток аэрозолей в Арктике в $600 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$, что выше оценок зарубежных исследователей – $140 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$ [14].

Вероятно, помимо местных источников аэрозольного вещества, аэрозоли могут поступать из Мончегорского, Апатитского и Кировского административных районов Мурманской области (далее *внутренние районы*). В период наблюдения резко преобладали ветры южных рум-

бов (около 60%), из них на долю ветров юго-западного и юго-юго-западного направлений приходилось более 90%. Геоморфологические особенности строения территории определяют возможность повышенного поступления аэрозолей в Мурманский импактный район с юга, из внутренних районов полуострова. Так, при южных ветрах в район устья р. Тулома и Кольского залива твёрдые аэрозольные частицы могут поступать вдоль депрессии оз. Имандра – р. Кола между хр. Волчьи-Тундры и северным отрогом Хибинских гор. При этом хр. Волчьи-Тундры препятствует поступлению аэрозольного вещества в западные исследуемые районы, а северный отрог Хибинских гор – в восточный район территории.

Концентрация тяжёлых металлов в талой снеговой воде

Было проведено исследование концентрации четырёх металлов – Zn, Pb, Cu и Cd – в свежеснегавшем снеге. Из литературных источников известно, что в Арктике в 1 м^3 воздуха в среднем

содержится, нг: Zn – 18,5, Cu – 0,341, Pb – 3,32 и Cd – 0,172 [9]. В фоновых районах Арктики средние концентрации металлов в снежном покрове даны в табл. 2. Ранее [6, 9] для Кольского полуострова в снежном покрове были зафиксированы концентрации Zn, Pb, Cu, значительно превышающие фоновые значения для Арктики, и очень низкое содержание Cd. В снежном покрове концентрация тяжёлых металлов на Кольском полуострове ниже, чем в крупных северных индустриальных центрах (города Норильск и Архангельск) [6, 9, 11, 13, 16]. В 2018 г. на севере Кольского полуострова в свежеснеговом снеге концентрации этих элементов значительно варьировали, сильно отличаясь от концентраций как в фоновых районах Арктики, так и в северных индустриальных центрах.

Цинк. Концентрация Zn в свежеснеговом снеге изменялась от 1,984 до 101,6 нг·г⁻¹, аналогичные диапазоны изменения характерны для крупных северных индустриальных центров [6, 9, 11, 13, 16]. Самая высокая концентрация Zn отмечалась в г. Мурманск и его окрестностях, где она в 2 раза превышала средние концентрации Zn в снежном покрове Кольского полуострова (см. табл. 2). В фоновых районах севера Кольского полуострова концентрация Zn была более низкой и не превышала 60 нг·г⁻¹. В этих районах средняя концентрация Zn в 1,5 раза больше средних концентраций Zn в снежном покрове Кольского полуострова. Возможно, высокая концентрация Zn связана с работой горно-добывающей отрасли на западе территории.

Медь. Концентрация Cu в свежеснеговом снеге изменялась от 0,112 до 48,06 нг·г⁻¹. Средняя концентрация Cu почти в 4 раза ниже, чем средняя концентрация Cu в снежном покрове Кольского полуострова (см. табл. 2). Высокие концентрации Cu отмечались в Мурманске и его окрестностях, но и здесь средние концентрации Cu в 2 раза ниже средних концентраций Cu в снежном покрове Кольского полуострова. Только в одном снегопаде (март 2018 г.) в свежеснеговом снеге на автономном ландшафте Мурманска концентрация Cu была сопоставима с концентрацией Cu в крупных северных индустриальных центрах (города Норильск и Архангельск). Во всех других случаях концентрация Cu в свежеснеговом снеге не превышала 20 нг·г⁻¹. Самая низкая концентрация Cu в свежеснеговом снеге

установлена на северо-западе территории (не более 4,5 нг·г⁻¹), что сопоставимо с концентрацией Cu в фоновых районах Арктики. На востоке территории в апреле 2018 г. в долинах рек Териберка и Эйнч концентрация Cu в свежеснеговом снеге была выше 10 нг·г⁻¹, во всех других случаях концентрация Cu не превышала 4,0 нг·г⁻¹.

Свинец. Концентрация Pb в свежеснеговом снеге – 0,02–10,3 нг·г⁻¹. Средняя концентрация Pb сопоставима со средней концентрацией Pb в снежном покрове Кольского полуострова (см. табл. 2). Высокие концентрации Pb установлены в Мурманске и его окрестностях и сопоставимы с концентрациями Pb в крупных северных индустриальных центрах. В пяти снегопадах в феврале–апреле 2018 г. в свежеснеговом снеге концентрация Pb была выше 2 нг·г⁻¹. Во всех других случаях она не превышала 1,2 нг·г⁻¹ и была сопоставима со средними концентрациями Pb в снежном покрове Кольского полуострова. Самые низкие концентрации Pb в свежеснеговом снеге установлены на северо-западе территории – не превышали 1 нг·г⁻¹, а средняя концентрация Pb в этой части территории сопоставима с концентрацией Pb в фоновых районах Арктики. На востоке территории (апрель 2018 г.) в свежеснеговом снеге в долинах рек Териберка и Эйнч концентрация Pb была выше 2,5 нг·г⁻¹, во всех других случаях концентрация Pb в свежеснеговом снеге не превышала 1 нг·г⁻¹. Средние концентрации Pb в восточном районе сопоставимы со средними концентрациями Pb в снежном покрове Кольского полуострова.

Кадмий. Концентрация Cd в свежеснеговом снеге изменялась от 0,028 до 4,99 нг·г⁻¹. Средняя концентрация Cd в свежеснеговом снеге на севере Кольского полуострова в 2018 г. была выше концентрации Cd в крупных северных индустриальных центрах (см. табл. 2). Высокие концентрации Cd в свежеснеговом снеге установлены в Мурманске и его окрестностях. Они в 2,5 раза выше по сравнению со средними концентрациями Cd в крупных северных индустриальных центрах; при этом концентрация Cd ниже 1 нг·г⁻¹ отмечалась всего дважды. Самые высокие концентрации Cd в свежеснеговом снеге (более 1,8 нг·г⁻¹) приурочены к апрельским снегопадам 2018 г. в восточной части района исследований; самые низкие наблюдались в течение всего периода работ на северо-западе Мурманского бе-

рега (не превышали $0,35 \text{ нг}\cdot\text{г}^{-1}$). Здесь средняя концентрация Cd по району ниже концентрации Cd в фоновых районах Арктики и сопоставима со средней концентрацией Cd в снежном покрове Кольского полуострова. На востоке территории (долины рек Териберка и Эйнч) в апреле 2018 г. в свежеснеговом снеге концентрация Cd была выше $1,5 \text{ нг}\cdot\text{г}^{-1}$, во всех других случаях концентрация Cd в свежеснеговом снеге не превышала $0,1 \text{ нг}\cdot\text{г}^{-1}$. Средняя концентрация Cd в восточном районе в 2,5 раза ниже средних концентраций Cd в крупных северных индустриальных центрах.

Опираясь на полученные значения концентраций Zn, Pb, Cu и Cd в свежеснеговом снеге, проведена оценка потока этих металлов с твёрдыми атмосферными осадками на поверхность земли севера Кольского полуострова (аналогично оценке потока твёрдых аэрозольных частиц).

Поток цинка изменялся от 0,4 до $55,2 \text{ мкг}\cdot\text{м}^{-2}$ за один снегопад, в среднем составляя $18,5 \pm 3,7 \text{ мкг}\cdot\text{м}^{-2}$, что даёт оценку в $1,5\text{--}1,7 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-2}$ за 120 сут. На всю площадь исследования за январь–май 2018 г. выпало 22–25 т цинка. Почти 70% всего выпавшего Zn отложилось в западном районе, в восточный район поступило менее 20%, а в Мурманск и зону его влияния – около 12%. При нормировании на площадь выделенных ранее районов установлено, что в Мурманском импактном районе коэффициент выпадения Zn равен $26 \text{ кг}\cdot\text{км}^{-2}$, в западном районе – $2,3 \text{ кг}\cdot\text{км}^{-2}$, а в восточном – $0,6 \text{ кг}\cdot\text{км}^{-2}$. *Поток меди* изменялся от 0,1 до $15,8 \text{ мкг}\cdot\text{м}^{-2}$ за один снегопад, в среднем составляя $3,12 \pm 0,96 \text{ мкг}\cdot\text{м}^{-2}$, что даёт оценку в $0,26\text{--}0,30 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-2}$ за 120 сут. На всю площадь исследования (за январь–май 2018 г.) выпало 3,6–4,2 т Cu. Почти 50% выпавшей меди отложилось в западном районе, в восточном районе выпало менее 35%, а в Мурманске и зоне его влияния – около 16%. При нормировании на площадь районов коэффициент выпадения Cu в Мурманском импактном районе равен $4,3 \text{ кг}\cdot\text{км}^{-2}$, в западном районе – $0,4 \text{ кг}\cdot\text{км}^{-2}$, а в восточном – $1 \text{ кг}\cdot\text{км}^{-2}$.

Поток свинца изменялся от 0,01 до $3,71 \text{ мкг}\cdot\text{м}^{-2}$ за один снегопад, в среднем составляя $0,82 \pm 0,26 \text{ мкг}\cdot\text{м}^{-2}$, что даёт оценку в $0,07\text{--}0,08 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-2}$ за 120 сут. На всю площадь исследования за январь–май 2018 г. выпало 0,95–1,1 т Pb. Из всех изученных металлов с атмосферными осадками наиболее равномерно в выделенных

районах осаждался Pb. Так, в западный и восточный районы поступило по 35%, а в Мурманск и его окрестности – около 30% Pb. При нормировании на площадь районов коэффициент выпадения Pb в Мурманском импактном районе равен $1,2 \text{ кг}\cdot\text{км}^{-2}$, в западном районе – $0,1 \text{ кг}\cdot\text{км}^{-2}$, а в восточном – $0,3 \text{ кг}\cdot\text{км}^{-2}$. *Поток кадмия* изменялся от 0,02 до $2,89 \text{ мкг}\cdot\text{м}^{-2}$ за один снегопад, в среднем составляя $0,56 \pm 0,19 \text{ мкг}\cdot\text{м}^{-2}$, что даёт оценку в $0,04\text{--}0,05 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-2}$ за 120 сут. На всю площадь исследования за январь–май 2018 г. выпало 650–750 кг Cd. Почти 55% выпавшего Cd отложилось в восточном районе, в западном районе выпало менее 15%, а в Мурманске и зоне его влияния – около 30%. При нормировании на площадь районов коэффициент выпадения Cd в Мурманском импактном районе равен $0,83 \text{ кг}\cdot\text{км}^{-2}$, в западном районе – $0,07 \text{ кг}\cdot\text{км}^{-2}$, а в восточном – $0,16 \text{ кг}\cdot\text{км}^{-2}$.

Можно предположить, что в западной части территории Zn и Cu – продукты местного горно-промышленного производства. Вероятно, Cd поступает в район только в результате сверхдальнего переноса воздушных масс. Свинец может быть как продуктом местного горно-промышленного производства, так и поступать в район при дальнем переносе воздушных масс. Также вероятно, что в Мурманском импактном районе и зоне его влияния есть свои источники металлов (Zn, Pb, Cu и Cd) либо они поступали сюда из внутренних районов полуострова, чему способствовали преобладающие в это время ветры южных румбов. В восточной части территории все металлы, вероятно, продукты дальнего переноса или поступают сюда из Мурманского импактного района, чему могли способствовать западные и северо-западные ветры, доля которых составляла около 30%.

Таким образом, на севере Кольского полуострова цинк и медь (и, по-видимому, большая часть свинца), с большой долей вероятности, относятся к продуктам цветной металлургии на западе территории. Возможно, что в Мурманске или его окрестностях есть свои источники этих элементов либо они поступают из внутренних районов полуострова. Вряд ли можно предполагать сверхдальний источник этих элементов с подавляющим выпадением их в г. Мурманск и достаточно равномерным выпадением по остальной территории севера Кольского по-

луострова. Другое дело кадмий. Минимальное (ниже фоновых значений для Арктики) выпадение этого элемента на западе территории, подавляющее накопление в восточном районе, где нет ни крупных населённых пунктов, ни каких либо промышленных объектов, даёт основание предполагать дальний его источник.

Заключение

Фоновый диапазон концентраций твёрдых нерастворимых частиц в январе–мае 2018 г. на севере Кольского полуострова составлял 1,9–8,5 мг/л в свежеснеговом снеге. В удалённых районах Арктики фоновые концентрации аэрозолей в снежном покрове не превышают 3 мг/л [1, 9, 12, 17, 20], следовательно, можно предположить, что 4–5 мг твёрдых аэрозолей в каждом литре талой снеговой воды представляют собой продукты региональных природных и антропогенных процессов. Мурманск – крупнейший узловой центр всех транспортных потоков: железнодорожных, морских, автомобильных и воздушных перевозок, сюда поступают и отсюда вывозятся продукты цветной металлургии и угольной промышленности. Поэтому неудивительно, что и концентрация, и поток твёрдых аэрозолей, а также тяжёлых металлов в районе Мурманска и его окрестностях максимальны для всей территории. Вопрос вызывает только высокая концентрация высокотоксичного кадмия, происхождение которого неясно и требует дополнительных исследований. Ещё один район с высокими концентрациями твёрдых аэрозолей расположен на западе территории, в центре цветной металлургии. Здесь низкие концентрации тяжёлых металлов в свежеснеговом снеге свидетельствуют об устойчивой экологической обстановке, так как они ниже предельно допустимого содержания металлов в атмосфере по действующим в Российской Федерации нормативам. Восточный район

по концентрации и потоку аэрозолей наиболее близок к фоновым районам Арктики.

Реакция снеговой воды в большинстве случаев сдвинута в нейтральную или слабощелочную сторону и не влияет на концентрацию нерастворимых аэрозолей в свежеснеговом снеге. Более высокое значение рН в западном районе, вероятно, связано с влиянием незамерзающего моря, что отмечали и другие исследователи [1, 9, 20]. Изучение плотности свежеснегового снега позволило отметить одну закономерность: в рыхлом свежеснеговом снеге (плотность менее 0,2 г/см³) общее количество твёрдых аэрозолей увеличивается с ростом плотности выпадающих твёрдых атмосферных осадков.

Подводя итог, отметим главное: 1) концентрация твёрдых аэрозольных частиц в свежеснеговом снеге в зимний период 2018 г. на севере Кольского полуострова в среднем составляла $4,04 \pm 0,24$ мг/л; 2) средние значения концентраций металлов в свежеснеговом снеге таковы, $\text{нг}\cdot\text{г}^{-1}$: Zn – $34,5 \pm 8,03$, Cu – $6,75 \pm 2,82$, Pb – $1,63 \pm 0,63$, Cd – $0,992 \pm 0,325$; 3) средний поток аэрозольных частиц на поверхность земли – $2,10 \pm 0,09$ мг·м² за один снегопад, или $1,03$ – $1,33$ мг·м⁻²·сут⁻¹. С твёрдыми атмосферными осадками на поверхность земли в среднем выпадает, $\text{мкг}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{сут}^{-1}$: Zn – 12,5–14,2; Cu – 2,2–2,5; Pb – 0,58–0,66; Cd – 0,31–0,42.

Благодарности. Работа выполнена в рамках темы НИР ММБИ КНЦ РАН 9-18-03 (номер государственной регистрации АААА-А18-118030690060-6) «Вертикальные и латеральные потоки осадочного вещества в береговых зонах Баренцева и Белого морей в условиях изменяющейся природной среды и климата».

Acknowledgments. The work was performed in the framework of the research topic of MMBI KSC RAS 9-18-03 (State registration number АААА-А18-118030690060-6) «Vertical and lateral flows of sedimentary substances in the coastal zones of the Barents and White seas in a changing environment and climate».

Литература

References

1. Шевченко В.П., Лисицын А.П., Штайн Р. (Stein R.), Горюнова Н.В., Ключевиткин А.А., Кравчишина М.Д., Кривс М. (Kriews M.), Новигацкий А.Н., Соколов В.Т., Филиппов А.С., Хаас Х.
1. Shevchenko V.P., Lisitzin A.P., Stein R., Goryunova N.V., Klyuvitkin A.A., Kravchishina M.D., Kriews M., Novigatsky A.N., Sokolov V.T., Filippov A.S., Haas H. Distribution and composition of insoluble particles in the snow

- (Haas H.) Распределение и состав нерастворимых частиц в снеге Арктики // Проблемы Арктики и Антарктики. 2007. № 75. С. 106–118.
2. Шевченко В.П., Воробьев С.Н., Кирпотин С.Н., Крицков И.В., Монасыпов Р.М., Покровский О.С., Политова Н.В. Исследования нерастворимых частиц в снежном покрове Западной Сибири на профиле от Томска до эстуария Оби // Оптика атмосферы и океана. 2015. Т. 28. № 6. С. 499–504.
 3. Лисицын А.П. Маргинальный фильтр океанов // Океанология. 1994. Т. 34. № 5. С. 735–743.
 4. Lisitzin A.P. Sea-ice and iceberg sedimentation in the ocean: Recent and Past. Berlin: Springer, 2002. 563 p.
 5. Митяев М.В. Мурманское побережье (геолого-геоморфологические и климатические особенности, современные геологические процессы). Апатиты: Изд. КНЦ РАН, 2014. 226 с.
 6. Болтенко Е.Л., Евсеев А.В., Корзун А.В., Сухова Т.Г. Химический состав снежного покрова, как показатель загрязнения на Кольском полуострове // Вестн. МГУ. Сер. 5. География. 1991. № 5. С. 60–64.
 7. Евсеев А.В., Красовская Т.М. Эколого-географические особенности природной среды районов крайнего Севера России. Смоленск: Изд-во Смоленского гос. ун-та, 1996. 232 с.
 8. Caritat P., Dyrds 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.
 9. Шевченко В.П. Влияние аэрозолей на среду и морское осадконакопление в Арктике. М.: Наука, 2006. 226 с.
 10. Куценогий К.П., Куценогий П.К. Аэрозоли Сибири. Итоги семилетних исследований // Сибирский экологический журнал. 2000. № 1. С. 11–20.
 11. Бояркина А.П., Байковский В.В., Васильев Н.В., Глухов Г.Г., Медведев М.А., Писарева Л.Ф., Резчиков В.И., Шелудько С.И. Аэрозоли в природных планшетах Сибири. Томск: Изд. ТГУ, 1993. 157 с.
 12. Виноградова А.А., Полиссар А.В. Элементный состав аэрозоля в атмосфере центральной части Российской Арктики // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 1995. Т. 32. С. 264–274.
 13. 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.
 14. Darby D.A., Naidu A.S., Mowatt T.C., Jones G. Sediment composition and sedimentary processes in of the Arctic. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Problems of the Arctic and Antarctic. 2007, 75: 106–118. [In Russian].
 2. Shevchenko V.P., Vorobiev S.N., Kirpotin S.N., Kritskov I.V., Monasyrov R.M., Pokrovsky O.S., Politova N.V. Studies of insoluble particles in the snow cover of Western Siberia on the profile from Tomsk to the Ob estuary. *Optika atmosfery i okeana*. Optics of the Atmosphere and Ocean. 2015, 28 (6): 499–504. [In Russian].
 3. Lisitzin A.P. Marginal Filter of the Oceans. *Okeanologiya*. Oceanology. 1994, 34 (5): 735–743. [In Russian].
 4. Lisitzin A.P. Sea-ice and iceberg sedimentation in the ocean: Recent and Past. Berlin: Springer. 2002: 563 p.
 5. Mityaev M.V. *Murmanskoe poberezh'e (geologo-geomorfologicheskie i klimaticheskie osobennosti, sovremennyye geologicheskie protsessy)*. Murmansk coast (geological, geomorphological and climatic features, modern geological processes). Apatity: Kola Science Center RAS, 2014: 226 p. [In Russian].
 6. Boltenko E.L., Evseev A.V., Korzun A.V., Sukhova T.G. The chemical composition of snow cover as an indicator of pollution on the Kola Peninsula. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5. Geografiya*. Herald of Moscow State University. Series 5. Geography. 1991, 5: 60–64. [In Russian].
 7. Evseev A.V., Krasovskaya T.M. *Ehkologo-geograficheskie osobennosti prirodnoy sredy rayonov kraynego Severa Rossii*. Ecological and geographical features of the natural environment of the regions of the Far North of Russia. Smolensk: Smolensk State University, 1996: 232 p. [In Russian].
 8. Caritat P., Dyrds M., Niskavaara H., Chekushin V., Bogatyrev I., Reimann C. Snow composition in eight catchments in the Central Barents Euro-Arctic region. *Atmospheric Environment*. 1998, 32 (14/15): 2609–2626.
 9. Shevchenko V.P. *Vliyanie aehrozoley na sredu i morskoe osadkonakoplenie v Arktike*. Effect of aerosols on the environment and marine sedimentation in the Arctic. Moscow: Science, 2006: 226 p. [In Russian].
 10. Kutsenogy K.P., Kutsenogy P.K. Aerosols of Siberia. Results of seven years of research. *Sibirskiy ehkologicheskiy zhurnal*. Siberian Journ. of Ecology. 2000, 1: 11–20. [In Russian].
 11. Boyarkina A.P., Baykovsky V.V., Vasilyev N.V., Glukhov G.G., Medvedev M.A., Pisareva L.F., Rezchikov V.I., Sheludko S.I. *Aerzoli v prirodnykh planshetakh Sibiri*. Aerosols in natural tablets of Siberia. Tomsk: Tomsk State University. 1993: 157 p. [In Russian].
 12. Vinogradova A.A., Polissar A.V. Elemental composition of aerosol in the atmosphere of the central part of the Russian Arctic. *Izvestiya Rossiyskoy Akademii Nauk. Seriya Fizika atmosfery i okeana*. News of the Russian Academy of Sciences. Series Physics of the atmosphere and the ocean. 1995, 32: 264–274. [In Russian].
 13. 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, 114: 377–394.

- the Arctic Ocean // *The Arctic Seas – Climatology, Oceanography, Geology and Biology*. Ed. Y. Herman. New York, 1989. P. 657–720.
15. 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.M., Ellis W., Gollovay J.N., Hansen L., Jickells T.D., Кнап А.И., Reinhard К.И., Schneider B., Soudine A., Tokos J.J., Tsunogai S., Wollast R., Zhou M. The atmospheric input of the trace species to the world ocean // *Global Biogeochem. Cycles*. 1991. V. 5. № 3. P. 193–259.
 16. 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.
 17. Шевченко В.П., Лисицын А.П., Виноградова А.А., Куценогий К.П., Смирнов В.В., Штайн Р. Аэрозоли Арктики и их влияние на окружающую среду // *Аэрозоли Сибири*. Новосибирск: Изд. СО РАН, 2006. С. 148–184.
 18. Чернов Р.А. Метаморфизм и термические свойства свежевыпавшего снега (по исследованиям в Подмоскovie) // *Лёд и Снег*. 2016. Т. 56. № 2. С. 199–206.
 19. Шевченко В.П., Иванов Г.И., Буровкин А.А., Джиноридзе Р.Н., Зернова В.В., Поляк Л.В., Шанин С.С. Потоки осадочного материала в проливе Святой Анны и восточной части Баренцева моря // *ДАН*. 1998. Т. 359. № 3. С. 400–403.
 20. Шевченко В.П., Лисицын А.П., Виноградова А.А., Смирнов В.В., Серова В.В., Штайн Р. Аэрозоли Арктики – результаты десятилетних исследований // *Оптика атмосферы и океана*. 2000. Т. 13. № 6/7. С. 551–576.
 21. Shevchenko V.P., Lisitzin A.P. Aeolian input // *The Arctic ocean organic carbon cycle: present and past*. Eds.: R. Stein, R.W. Macdonald. Berlin-Heidelberg – New York: Springer, 2003. P. 53–54.
 22. Гордеев В.В., Лисицын А.П. Тяжелые металлы в ледовом покрове Баренцева моря // *Океанология*. 2005. Т. 45. № 5. С. 777–784.
 14. 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*. Ed. Y. Herman. New York, 1989: 657–720.
 15. 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.M., Ellis W., Gollovay J.N., Hansen L., Jickells T.D., Кнап А.И., Reinhard К.И., Schneider B., Soudine A., Tokos J.J., Tsunogai S., Wollast R., Zhou M. The atmospheric input of the trace species to the world ocean. *Global Biogeochem. Cycles*. 1991, 5 (3): 193–259.
 16. Igamberdiev V.M., Tereshenkov O.M., Kutyev Kh.A., Popova E.N. Assessment of the current state of the environment: Norilsk industrial region. *Narodnoe hozyaystvo Respubliki Komi*. National Economy of the Komi Republic. 1994, 1: 54–61. [In Russian].
 17. Shevchenko V.P., Lisitzin A.P., Vinogradova A.A., Kutsenogy, K.P., Smirnov, V.V., Stein, R. Aerosols of the Arctic and their impact on the environment. *Aehrozoli Sibiri*. Aerosols of Siberia. Novosibirsk: Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 2006: 148–184. [In Russian].
 18. Chernov R.A. Metamorphism and thermal properties of newly fallen snow (according to research in the Moscow region). *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2016, 56 (2): 199–206. [In Russian].
 19. Shevchenko V.P., Ivanov G.I., Burovkin A.A., Dzhinoridze R.N., Zernova V.V., Polyak L.V., Shanin S.S. Flows of sedimentary material in the St Anne's Strait and the eastern part of the Barents Sea. *Doklady Akademii Nauk*. Proc. of the Academy of Sciences. 1998, 359 (3): 400–403. [In Russian].
 20. Shevchenko V.P., Lisitzin A.P., Vinogradova A.A., Smirnov V.V., Serova V.V., Shtayn R. Aerosols of the Arctic – the results of decades of research. *Optika atmosfery i okeana*. Optics of the Atmosphere and the Ocean. 2000, 13 (6/7): 551–576. [In Russian].
 21. Shevchenko V.P., Lisitzin A.P. Aeolian input // *The Arctic Ocean Organic Carbon Cycle: Present and Past*. Eds.: R. Stein, R.W. Macdonald. Berlin-Heidelberg-New York: Springer. 2003: 53–54.
 22. Gordeev V.V., Lisitzin A.P. Heavy metals in the ice cover of the Barents Sea. *Okeanologiya*. Oceanology. 2005, 45 (5): 777–784. [In Russian].