

Научная статья

УДК 551.577

doi:10.37614/2949-1185.2023.2.3.007

ТВЕРДЫЕ АТМОСФЕРНЫЕ ОСАДКИ В Г. МУРМАНСКЕ И ЕГО ОКРЕСТНОСТЯХ

**Максим Валентинович Митяев^{1✉}, Марина Васильевна Герасимова²,
Елена Ивановна Дружкова³, Татьяна Геннадьевна Ишкулова⁴, Мария Юрьевна Меньшакова⁵**

^{1–4}Мурманский морской биологический институт Российской академии наук, г. Мурманск, Россия,

⁵Мурманский арктический государственный университет, г. Мурманск, Россия

¹mityaev@mmbi.info, ²gerasimova@mmbi.info, ³druzhkova@mmbi.info,

⁴ishkulova@mmbi.info, ⁵menshakova.maria@masu.edu.ru

Аннотация

Комплексные исследования твердых атмосферных осадков в г. Мурманске и его окрестностях были проведены 2 января 2018 г.–30 декабря 2022 г. Получены данные о концентрации в свежеснеге твердых нерастворимых частиц (9.19 ± 0.51 мг/л), их компонентов (тяжелых металлов: цинка – 60.1 ± 9.8 нг/г, меди – 11.0 ± 2.6 нг/г, свинца – 3.28 ± 0.18 нг/г, кадмия – 0.859 ± 0.096 нг/г; биогенных элементов: нитратов – 79 ± 11 мкг-ат/л, нитритов – 1.02 ± 0.14 мкг-ат/л, фосфатов – 4.64 ± 0.67 мкг-ат/л и силикатов – 25 ± 5 мкг-ат/л), органическом веществе (21.2 ± 2.2 мг/л), а также количестве полимерных частиц (фрагментов – 7766 ± 1401 частиц/л, микроволокон – 638 ± 134 нити/л, макроволокон – 29 ± 4 нити/л). Выявлена связь количества нерастворимых частиц с направлением поступления воздушных масс. Воздушные массы со стороны Баренцева моря приносили твердые атмосферные осадки с меньшим количеством нерастворимых аэрозолей (в том числе тяжелых металлов, полимерных частиц и органического вещества), чем воздушные массы, поступавшие с континента. Количество биогенных элементов в твердых атмосферных осадках не зависит от направления поступления воздушных масс.

Ключевые слова:

твердые атмосферные осадки, аэрозоли, тяжелые металлы, биогенные элементы, органическое вещество, микропластик, г. Мурманск

Original article

SOLID ATMOSPHERIC PRECIPITATION IN MURMANSK AND ITS ENVIRONS

**Maksim V. Mityaev^{1✉}, Marina V. Gerasimova²,
Elena I. Druzhkova³, Tatyana G. Ishkulova⁴, Maria Yu. Menshakova⁵**

^{1–4}Murmansk Marine Biological Institute of the Russian Academy of Sciences, Murmansk, Russia

⁵Murmansk Arctic State University, Murmansk, Russia

¹mityaev@mmbi.info, ²gerasimova@mmbi.info, ³druzhkova@mmbi.info,

⁴ishkulova@mmbi.info, ⁵menshakova.maria@masu.edu.ru

Abstract

In the period from January 2, 2018 to December 30, 2022, a comprehensive study of solid atmospheric precipitation was carried out in Murmansk and its environs. Data were obtained on the concentration in freshly fallen snow of solid insoluble particles (9.19 ± 0.51 mg/l) and their components: heavy metals (zinc – 60.1 ± 9.8 ng/g, copper – 11.0 ± 2.6 ng/g, lead – 3.28 ± 0.18 ng/g, cadmium – 0.859 ± 0.096 ng/g), nutrients (nitrates – 79 ± 11 µg-at/l, nitrites – 1.02 ± 0.14 µg-at/l, phosphates – 4.64 ± 0.67 µg-at/l, silicates – 25 ± 5 µg-at/l) and organic matter (21.2 ± 2.2 mg/l), as well as the amount of polymer particles (fragments – 7766 ± 1401 particles per liter, micro-fibers – 638 ± 134 threads per liter, macro-fibers – 29 ± 4 threads per liter). The relationship between the number of insoluble particles and the direction of air masses inflow was revealed. Air masses coming from the Barents Sea brought solid precipitation with less insoluble aerosols (including heavy metals, polymer particles and organic matter) than air masses coming from the continent. The amount of biogenic elements in solid atmospheric precipitation does not depend on the direction of inflow of air masses.

Keywords:

solid precipitation, aerosols, heavy metals, biogenic elements, organic matter, microplastic, Murmansk

Введение

Снег вымывает из атмосферы твердые и растворенные вещества (Шевченко, 2006; Аэрозоли ..., 2006; Распределение ..., 2007; Исследования ..., 2015), характеризующие атмосферу конкретного

региона зимой (Химический ..., 1991; Евсеев, Красовская, 1996; Snow ..., 1998). Высокоширотное положение г. Мурманска обуславливает выпадение твердых атмосферных осадков в течение 180–200 сут. в году (Митяев, 2014), но близость незамерзающего моря делает погоду крайне неустойчивой и ветреной. Сильные ветры способны переносить на дальнее расстояние не только мелкие, но и крупные частицы вещества, которые затем накапливаются в снежном покрове. Этот материал, хотя и переносится через атмосферу, нельзя считать аэрозольным веществом, так как время его жизни в атмосфере мало, а слой воздуха, в котором переносится эоловый материал, редко превышает первые десятки метров. Незамерзающее море является первопричиной большого количества теплых (с положительной температурой воздуха) зимних дней (может достигать до 10 сут. в месяц), в течение которых часть накопленного вещества вымывается талой водой из снежной толщи. На севере Кольского полуострова оба эти фактора создают условия, при которых отбор проб из толщи снега в конце зимнего периода не целесообразен, так как снег не содержит достоверной информации об аэрозольном веществе, позволяющей оценить роль атмосферы в его поставке.

В связи с этим в ММБИ РАН геологической группой при активном содействии биологов и гидрохимиков была разработана и апробирована методика работ со свежевыпавшим снегом, которая позволяет достоверно определять качественный (вещественный) состав аэрозолей и их количественную характеристику.

Известно, что на природный уровень концентрации вещества в атмосфере накладываются выбросы горно-металлургических комбинатов и городских инфраструктур (Оценка ..., 1994; Аэрозоли ..., 1993; Viklander, 1999; Шевченко, 2006). В научной литературе приведены данные о значительном загрязнении снежного покрова Кольского полуострова, в котором накапливаются и перераспределяются различные химические соединения и элементы (Химический ..., 1991; Нерастворимые ..., 2019). Мурманское побережье не является исключением, здесь в свежевыпавшем снеге выявлены значительные концентрации нерастворимых частиц, микропластика, биогенных элементов и тяжелых металлов. Одним из центров загрязнения является г. Мурманск, поэтому цель работы – оценить качественный состав вещества, заключенного в свежевыпавшем снеге и его количественные показатели, характеризующие атмосферу над г. Мурманском и его окрестностями.

Материал и методы

Пробы свежевыпавшего снега отбирали со 2 января 2018 г. по 30 декабря 2022 г. на трех станциях в Первомайском районе г. Мурманска (доминирующая высота с координатами 68°56.549' с. ш., 33°03.357' в. д.; в 1 км от гаражных кооперативов; в 3 км от ТЭЦ) и его окрестностях: в среднем течении ручья Кильдинский (68°53.185' с. ш., 33°17.668' в. д.) на верховых болотах в 1 км от автодороги “Кола–Серебрянские ГЭС”, в устье р. Тулома (68°48.036' с. ш., 32°34.239' в. д.) и в русле реки (со льда) в 800 м от автодороги “Лотта”.

Отбор проб снега проводили на следующий день после снегопада чистым пробоотборником из пищевой нержавеющей стали в плотные полиэтиленовые пакеты объемом 10 л и стеклянные емкости объемом 1–2 л с притертыми крышками. Чтобы исключить любое ветровое загрязнение снежного покрова отбор проб осуществляли против ветра в тихую погоду (скорость ветра < 5 м/с). Для исключения попадания уплотненного снега отбирался только свежевыпавший верхний слой толщиной 1–3 мм. После доставки проб в лабораторию их помещали в холодильник и хранили при температуре –5 °С 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 мощность 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 в закрытых емкостях (чтобы исключить испарение талой воды). В зависимости от объема талой снеговой воды ее делили на несколько частей. Первую часть объемом не менее 1 л фильтровали через предварительно взвешенные ядерные лавсановые фильтры с диаметром рабочей поверхности 47 мм и диаметром пор 0.45 мкм. Фильтры с веществом высушивали в термостате при температуре 50–60 °С 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 сухой массы аэрозольных частиц на фильтре к объему профильтрованной воды. Вторую часть талой воды объемом не менее 100 мл отбирали в чистую пластиковую емкость для определения концентраций ионов Zn, Pb, Cu и Cd на вольт-амперометрическом анализаторе TA-Lab (с ртутным электродом; номер в Госреестре 44076-10), точность определения ± 20 %. Полученные показатели концентрации пересчитывали на единицу массы сухого вещества. Часть талой воды объемом не менее 200 мл использовали для химического анализа на содержание биогенных элементов (азота нитратного, азота нитритного, фосфора фосфатного, минерального кремния) с применением традиционных фотоколориметрических методов на спектрофотометре ЭКРОС ПЭ-5300ви (абсолютная погрешность прибора ± 0.5 %). Минеральные формы азота (азот нитритный NO_2^- и азот нитратный NO_3^-) определяли методом Бендшнайдера-Робинсона (при длине волны 540 нм, в кюветах длиной 10–20 мм; чувствительность метода 0.01 мкмоль/л), минеральный фосфор (фосфор фосфатный PO_4^{3-}) – методом Морфи-Райли (при длине волны 870 нм, в кювете длиной 50 мм; ошибка метода 2–6 %), минеральный кремний (SiO_3^{2-}) – методом Королева (при длине волны 870 нм, в кювете длиной 50 мм; ошибка метода 2–6 %) (Современные ..., 1992; Руководство ..., 1993, 2003).

Пробы снега, отобранные в стеклянные емкости, фильтровали под вакуумом (при разрежении не более 0.2 атм) в стеклянных фильтрационных насадках через специально подготовленные черные ядерные фильтры с диаметром пор 0.45 мкм. Подготовка фильтров заключалась в протравливании их в 3 %-м растворе соляной кислоты в течение 3 сут. с последующей промывкой дистиллированной водой, затем фильтры сушили в термостате при температуре 60 °С в эксикаторе (Распределение ..., 2007). Непосредственно после фильтрации проб фильтры окрашивали раствором Нильского красного в n-гексане в течение 30 мин. (Arctic ..., 2018) и вновь помещали в эксикатор. В чистой аналитической лаборатории фильтры просматривались под бинокулярным микроскопом МБС-10 (ув. 10–40) для учета количества нерастворимых частиц (минеральных, биогенных и полимерных макроволокон). Далее препараты анализировали под эпифлуоресцентным микроскопом Carl Zeiss AxioImager D1 при ув. 50–100. При работе в лаборатории постоянно осуществлялся контроль чистоты используемой посуды, перед окончанием работ проводился осмотр неиспользованных пустых фильтров под бинокулярным микроскопом МБС-10. За весь период исследований никаких загрязнений лабораторной посуды, пустых фильтров выявлено не было. Необходимо отметить, что частицы, которые нельзя с уверенностью отнести к полимерам (менее 10 микрон и не изменившие цвет при окрашивании) при подсчете не учитывались. Граничным значением для разделения микро- и макропластика нами принято 1000 мкм, аналогично значению, обоснованному в работе Н. Хартмана с соавторами (Microplastic ..., 2015).

Водородный показатель талой снеговой воды определяли стационарным рН-метром (точность 0.01 рН). Всего отобрано и проанализировано 93 пробы свежеснежавшего снега, характеризующих 51 снегопад.

Результаты и обсуждение

Плотность свежеснежавшего снега. Количество нерастворимых частиц в снеге традиционно представляют в относительных единицах в пересчете на объем талой воды (мг/л, нг/г, ppm и др.) (Шевченко, 2006). На наш взгляд, это не всегда оправдано, так как из одинаковых объемов снега с различной плотностью будет получен разный объем талой воды. Из этого следует, что сравнение результатов из разных территорий без знания плотности снежного покрова некорректно и может приводить к ошибочным суждениям.

Плотность свежеснежавшего снега зависит от кристаллической структуры снежинок и влажности снега, температуры и влажности приземного слоя воздуха (Чернов, 2016). В городе Мурманске и его окрестностях плотность свежеснежавшего снега в период наблюдений изменялась от 0.117 до 0.213 г/см³, в среднем составляя 0.151 ± 0.004 г/см³ (n = 186). Таким образом, из 1 дм³ свежеснежавшего снега могло быть получено 117–213 мл пресной воды, т. е. объемы талой

воды отличались почти в 2 раза. Следовательно, при одинаковых содержаниях твердых частиц концентрация аэрозолей будет существенно отличаться.

В зимние периоды 2018–2022 гг. в г. Мурманске и его окрестностях плотный мокрый свежеснеживавший снег ($> 0.2 \text{ г/см}^3$) наблюдался редко – в 5 % случаев, в то время как сухой пушистый снег ($< 0.13 \text{ г/см}^3$) – почти каждый четвертый снегопад (в 24 % случаев). В Мурманске средняя плотность свежеснеживавшего снега составляла $0.159 \pm 0.003 \text{ г/см}^3$ ($n = 92$), в 10 км от города – $0.148 \pm 0.005 \text{ г/см}^3$ ($n = 66$), в 20 км от города – $0.137 \pm 0.004 \text{ г/см}^3$ ($n = 28$). При приближении к городу плотность свежеснеживавшего снега увеличивается, это, с большой долей вероятности, связано с воздействием на атмосферу городской инфраструктуры.

Водородный показатель свежеснеживавшего снега. Механизмы поступления химических веществ, в том числе тяжелых металлов, от техногенных источников в компоненты экосистем различны. Один из главных – аэротехногенные выбросы в атмосферу химических веществ с последующим их выпадением на поверхность земли с атмосферными осадками. При исследовании атмосферных осадков важнейшей проблемой является выявление степени их кислотности. Повышение кислотности способствует мобилизации тяжелых металлов и их проникновению в различные среды (Аэрозоли ..., 2000).

В зимний период в 2018–2022 гг. pH талой снеговой воды в г. Мурманске и его окрестностях изменялся от 5.31 до 7.63 при среднем значении – 6.62 ± 0.12 ($n = 186$) и модальном значении – 6.75. Среднее значение pH снеговой воды близко к нейтральному. Достоверных различий в значениях pH талой снеговой воды в Мурманске (6.62 ± 0.12 , $n = 92$) от pH в его окрестностях (в 10 км от города – 6.49 ± 0.27 , $n = 66$; в 20 км от города – 6.73 ± 0.19 , $n = 28$) не наблюдалось.

Исследования реакции талой снеговой воды свидетельствуют о преобладании в атмосферных осадках, выпавших в г. Мурманске и его окрестностях, кислотных компонентов над щелочными. Аналогичные значения pH талой снеговой воды наблюдались на севере Мурманской области в городах Печенга, Североморск-3 и поселках Тулома, Лопарская – в среднем составляя 6.77 ± 0.22 ($n = 11$).

Концентрация твердых нерастворимых частиц в свежеснеживавшем снеге в 2018–2022 гг. в г. Мурманске и его окрестностях изменялась от 2.87 до 186 мг/л, в среднем составляя $9.19 \pm 0.51 \text{ мг/л}$ ($n = 93$). Это выше, чем фоновое содержание аэрозолей в снежном покрове Арктики и Кольского полуострова (Виноградова, Полисар, 1995; Аэрозоли ..., 2000; Куценогий, Куценогий, 2000; Распределение ..., 2007), но ниже чем концентрация нерастворимых частиц в крупных импактных районах (Химический ..., 1991; Оценка ..., 1994; Viklander, 1999). Среднегодовое значение концентрации нерастворимых частиц в свежеснеживавшем снеге в Мурманске в 2018–2022 гг. составила $13.03 \pm 1.85 \text{ мг/л}$ ($n = 48$), в 10 км от города – $5.50 \pm 0.45 \text{ мг/л}$ ($n = 28$), в 20 км от города – $4.64 \pm 0.37 \text{ мг/л}$ ($n = 17$). Если в Мурманске концентрация нерастворимых частиц достигала 186 мг/л, то в 10 км от города она не превышала 12 мг/л, а в 20 км от города – 8 мг/л (при этом концентрации менее 2 мг/л никогда не наблюдались). Фоновый диапазон концентраций нерастворимых аэрозолей в свежеснеживавшем снеге в г. Мурманске и его окрестностях в исследуемый период составлял 3–15 мг/л. Концентрации нерастворимых частиц имеют трехмодальное распределение: первая мода – 4.9 мг/л, вторая – 28.6 мг/л, третья – 44.9 мг/л.

С 2018 по 2020 годы среднегодовые концентрации нерастворимых частиц в свежеснеживавшем снеге постепенно увеличивались (рис. 1а) и в 2020 г. достигли $8.7 \pm 0.46 \text{ мг/л}$ ($n = 24$), в дальнейшем они стали резко снижаться и в 2022 г. составили $4.68 \pm 0.29 \text{ мг/л}$ ($n = 10$). Наиболее высокие концентрации нерастворимых частиц в свежеснеживавшем снеге (без ураганно высоких) наблюдались в декабрьские (в среднем – $8.69 \pm 0.97 \text{ мг/л}$, $n = 13$) и февральские (в среднем – $8.45 \pm 0.69 \text{ мг/л}$, $n = 14$) снегопады, наиболее низкие – в октябрьские (в среднем – $5.77 \pm 0.81 \text{ мг/л}$, $n = 9$) и майские ($5.21 \pm 0.79 \text{ мг/л}$, $n = 5$) снегопады (рис. 1б).

При удалении от города концентрация нерастворимых частиц в свежеснеживавшем снеге снижается, и в 20 км от города она сопоставима с количеством аэрозолей в снеге фоновых районов северного побережья Кольского полуострова (Нерастворимые ..., 2019).

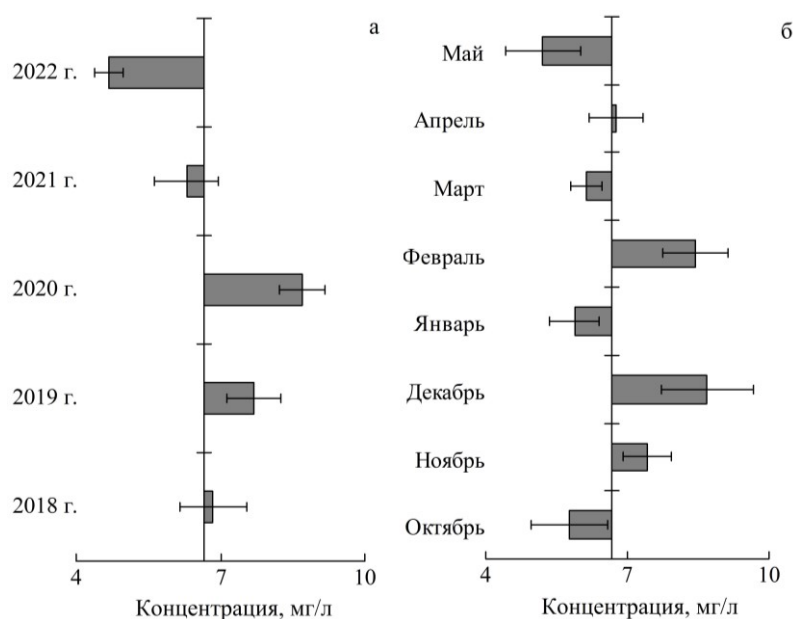


Рис. 1. Среднегодовые (а) и среднемесячные (б) концентрации нерастворимых частиц в снеге
Fig. 1. Average annual (a) and average monthly (b) concentrations of insoluble particles in snow

Концентрация тяжелых металлов в талой снеговой воде. Из литературных источников известно, что в Арктике в 1 м³ воздуха в среднем содержится 18.5 нг цинка, 3.32 нг свинца, 0.341 нг меди и 0.172 нг кадмия. Эти тяжелые металлы, адсорбируясь снежными кристаллами, выпадают из атмосферы на земную поверхность (Шевченко, 2006). В снежном покрове Кольского полуострова концентрации Zn, Pb, Cu, значительно превышают концентрации этих элементов в фоновых районах Арктики (в центральных и северных районах Гренландского, Баренцева, Карского морей и моря Лаптевых, центральной части Северного Ледовитого океана) (Виноградова, Полисар, 1995; Аэрозоли ..., 2000; Куценогий, Куценогий, 2000; Шевченко, 2006), но при этом они ниже, чем в крупных северных промышленных центрах – городах Норильск и Архангельск (Химический ..., 1991; Оценка ..., 1994; Viklander, 1999; Шевченко, 2006; табл. 1).

Среднее содержание тяжелых металлов в талой снеговой воде, нг/г
Average content of heavy metals in snowmelt water, ng/g

Таблица 1

Table 1

Район	Zn	Cu	Pb	Cd
Фоновые районы Арктики	7.01	0.771	0.397	0.240
Города Норильск и Архангельск	47.2	42.0	4.64	0.708
Кольский полуостров	16.9	24.1	0.981	0.116
Север Кольского полуострова, 2018 г.	34.5±8.03	6.75±2.82	1.63±0.63	0.992±0.325

ПРИМЕЧАНИЕ. Здесь и далее: ± – доверительный интервал.

Цинк. В свежевыпавшем снеге в г. Мурманске и его окрестностях концентрация Zn изменялась от 7.94 до 118.4 нг/г, аналогичные диапазоны изменения характерны для северных промышленных центров (Химический ..., 1991; Оценка ..., 1994; Viklander, 1999; Шевченко, 2006). Среднеголетняя концентрация Zn в районе исследований составила 60.1±9.8 нг/г, при этом в г. Мурманске – 48.5±14.5 нг/г, в 10 км от города – 72.6±9.2 нг/г, в 20 км от города – 102.7±16.1 нг/г. Вероятно, высокая концентрации Zn связана с работой горнодобывающего предприятия на северо-западе Мурманской области. Наиболее высокие концентрации Zn в свежевыпавшем снеге наблюдались в апрельские и мартовские

снегопады 2021 г., а его низкие концентрации постоянно наблюдались в февральские снегопады. В целом, начиная с 2019 г., среднегодовые концентрации Zn постоянно увеличивались (рис. 2).

Медь. Концентрация Cu в свежеснегоснеге в г. Мурманске и его окрестностях изменялась от 2.46 до 32.2 нг/г. Среднегодовая концентрация Cu в г. Мурманске и его окрестностях составила 11.0 ± 2.6 нг/г, в г. Мурманске – 11.5 ± 3.7 нг/г, в 10 км от города – 8.9 ± 1.2 нг/г, в 20 км от города – 5.2 ± 0.9 нг/г. Количество Cu в снеге значительно ниже, чем в крупных северных промышленных центрах, а также ниже, чем в снежном покрове Кольского полуострова в целом (Химический ..., 1991; Оценка ..., 1994; Viklander, 1999; Шевченко, 2006). Только в единичные снегопады концентрация Cu в свежеснегоснеге в районе г. Мурманска и его окрестностях может превышать среднюю концентрацию этого металла в снежном покрове Кольского полуострова (Нерастворимые ..., 2019).

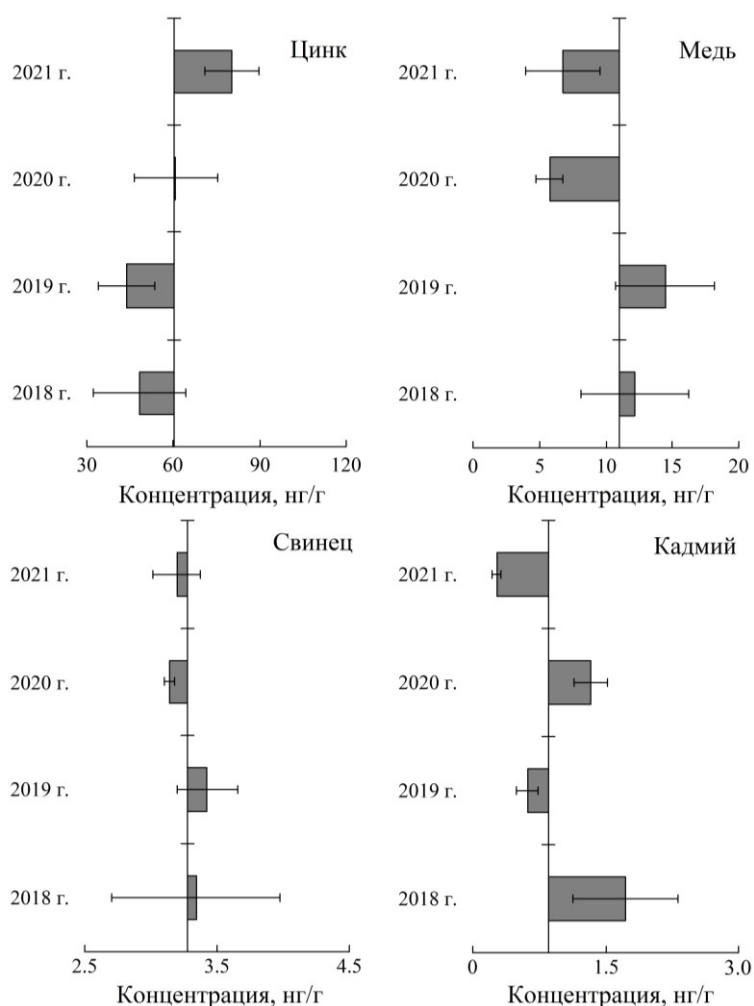


Рис. 2. Концентрации тяжелых металлов

Fig. 2. Change in the concentration of heavy metals

Наиболее высокие концентрации Cu в свежеснегоснеге наблюдались в февральские снегопады 2019 г., низкие – в апрельские и мартовские снегопады постоянно. В целом в 2018–2019 гг. среднегодовые концентрации Cu были высокими, в 2020–2021 гг. они резко снизились – более чем в 2 раза (рис. 2).

Свинец. В районе исследований концентрация Pb в свежеснегоснеге изменялась от 0.05 до 332 нг/г, при этом среднегодовая концентрация составила 3.28 ± 0.18 нг/г (в г. Мурманске –

7.22 ± 2.7 нг/г, в 10 км от города – 1.44 ± 0.61 нг/г, в 20 км от города – 0.20 ± 0.04 нг/г). Высокая концентрация Pb отмечена в г. Мурманске, она в 1.5 раза превышает аналогичные значения в крупных северных промышленных центрах – Норильске и Архангельске (табл. 1). Уже в 10 км от Мурманска концентрация Pb снижается и становится сопоставима со средним количеством Pb в снежном покрове Кольского полуострова (Химический ..., 1991; Оценка ..., 1994; Viklander, 1999; Шевченко, 2006; Нерастворимые ..., 2019). В 20 км от г. Мурманска количество Pb в снеге в среднем ниже, чем в фоновых районах Арктики (Виноградова, Полисар, 1995; Куценогий, Куценогий, 2000; Шевченко, 2006; Нерастворимые ..., 2019).

Наиболее высокая концентрация Pb в свежеснеговом снеге наблюдалась в февральские снегопады 2019 и 2020 гг., низкая – в апрельские и мартовские снегопады. В целом в 2018–2019 гг. среднегодовые концентрации Pb были высокими, с большим стандартным отклонением, а в 2020–2021 гг. они значительно снизились (рис. 2).

Кадмий. В свежеснеговом снеге в г. Мурманске и его окрестностях концентрация Cd изменялась от 0.010 до 20.68 нг/г, среднемноголетняя концентрация Cd в исследуемом районе составила 0.859 ± 0.096 нг/г, при этом в г. Мурманске – 1.293 ± 0.595 нг/г, в 10 км от города – 0.423 ± 0.110 нг/г, в 20 км от города – 0.436 ± 0.193 нг/г. Среднее количество Cd в снеге в Мурманске почти в 2 раза выше, чем в крупных северных промышленных центрах – Норильске и Архангельске (табл. 1). Уже в 10 км от города концентрация Cd снижается в 3 раза, но все равно остается высокой, почти в 4 раза превышая его средние показатели в снежном покрове Кольского полуострова (табл. 1).

Наиболее высокая концентрация Cd в свежеснеговом снеге наблюдалась в февральские снегопады 2019 и 2020 гг. (в 2019 г. была выявлена ураганно высокая концентрация – более 20 нг/г), низкая – наблюдалась постоянно в мартовские снегопады. В целом в 2018–2021 гг. отмечено снижение количества Cd, но при этом намечается трехлетняя квазициклическая тенденция – снижение концентрации с последующим ее увеличением (2018–2020 гг.), либо ее увеличение с последующим снижением (2019–2021 гг.) (рис. 2).

В 2018–2021 годах в свежеснеговом снеге в г. Мурманске и его окрестностях наблюдался рост концентрации цинка и снижение меди, свинца и кадмия. При этом концентрация цинка, свинца и кадмия значительно превышает средние значения этих элементов в снежном покрове Кольского полуострова. Необходимо отметить, что при удалении от города содержание меди, свинца и кадмия в снеге уменьшается, а цинка увеличивается. В целом в г. Мурманске и его окрестностях в атмосфере содержится повышенное количество тяжелых металлов (Нерастворимые ..., 2019).

Концентрация биогенных элементов в свежеснеговом снеге. Суммарное количество биогенных элементов в талой снеговой воде в районе исследований изменялось от 4.7 до 348 мкг-ат/л (в среднем – 90.7 ± 11.4 мкг-ат/л, $n = 92$). Фоновый диапазон концентраций биогенных элементов в талой снеговой воде – 20–110 мкг-ат/л.

В течение четырех лет наблюдалась стабильная суммарная концентрация биогенных элементов в талой снеговой воде, только в 2020 г. она значительно снизилась (табл. 2, рис. 3а). Аномально высокие концентрации биогенных элементов (более 150 мкг-ат/л) постоянно наблюдались в февральские и апрельские снегопады (рис. 3б).

Концентрация биогенных элементов имеет одномодальное распределение (мода – 84 мкг-ат/л). Непосредственно в г. Мурманске она изменялась от 4.7 до 348 мкг-ат/л, в среднем составляя 85 ± 14 мкг-ат/л ($n = 54$), в 10 км от города – от 9.0 до 272 мкг-ат/л (в среднем – 104 ± 23 мкг-ат/л, $n = 26$), в 20 км от города – от 13 до 220 мкг-ат/л (в среднем – 89 ± 9 мкг-ат/л, $n = 12$).

В составе биогенных элементов преобладали нитраты, доля которых не опускалась ниже 25 % (в среднем – 82 ± 3 %). Наиболее высокая доля нитратов среди биогенных элементов отмечена в 20 км от города, где она всегда более 75 % (в среднем – 92 ± 3 %).

Установлено, что в февральские и апрельские снегопады в свежеснеговом снеге концентрация биогенных элементов не опускается ниже 130 мкг-ат/л, а в мартовские и майские снегопады не превышает 75 мкг-ат/л (табл. 3).

Таблица 2

Средняя концентрация биогенных элементов, мкг-ат/л

Table 2

Average concentration of biogenic elements in freshly fallen snow, µg-at/l

Район	2018 г.	2019 г.	2020 г.	2021 г.
Г. Мурманск	85±15 (n = 2)	102±10 (n = 18)	74±14 (n = 14)	73±8 (n = 18)
10 км от города	120±13 (n = 6)	104±23 (n = 6)	99±24 (n = 6)	152±49 (n = 8)
20 км от города	89±9 (n = 3)	220±34 (n = 3)	81±18 (n = 6)	92±6 (n = 3)

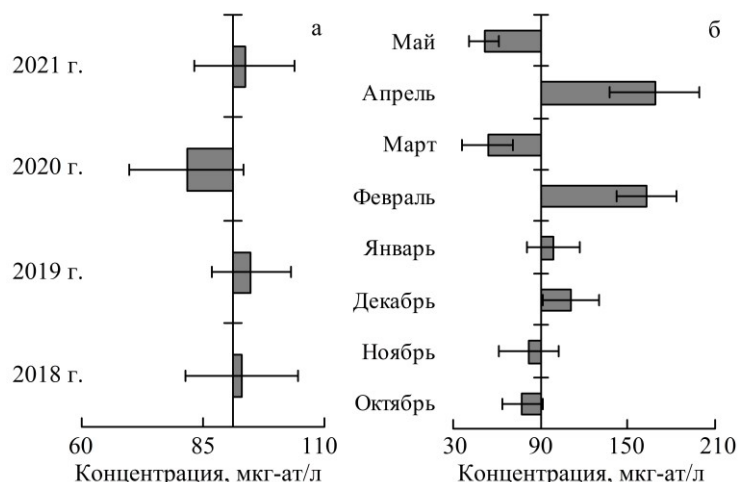


Рис. 3. Среднегодовые (а) и среднемесячные (б) концентрации биогенных элементов

Fig. 3. Average annual (a) and average monthly (b) concentration of biogenic elements

Таблица 3

Среднемесячная концентрация биогенных элементов, мкг-ат/л

Table 3

Average monthly concentration of biogenic elements, µg-at/l

Месяц	Биогенные элементы	Нитраты	Нитриты	Фосфаты	Минеральный кремний
Октябрь (n = 8)	77±17	52±6	0.63±0.06	5.3±1.3	19.9±7.0
Ноябрь (n = 10)	82±20	51±16	1.37±0.31	2.3±1.1	26.8±3.5
Декабрь (n = 10)	111±19	104±18	1.29±0.29	3.8±0.3	2.2±0.5
Январь (n = 18)	99±19	86±15	0.71±0.21	4.6±1.0	7.8±2.3
Февраль (n = 18)	162±21	101±16	0.89±0.18	6.7±0.7	53.9±4.5
Март (n = 14)	54±18	36±12	0.96±0.21	6.1±0.6	11.0±4.2
Апрель (n = 10)	168±31	95±17	0.63±0.17	4.7±1.2	68.4±12.6
Май (n = 4)	52±10	41±6	1.16±0.17	3.1±0.3	6.2±0.7

Количество нитратов в талой снеговой воде изменялось от 4 до 270 мкг-ат/л, в среднем составляя 79±11 мкг-ат/л (n = 92). Максимальная концентрация нитратов наблюдалась в 20 км от города – в среднем составляя 102±2 мкг-ат/л (n = 12), а минимальная в Мурманске – 72±10 мкг-ат/л (n = 54). Концентрация нитратов в талой снеговой воде в 2018 и 2020 гг. была низкая (менее 70 мкг-ат/л), а в 2019 и 2021 гг. – высокая (более 85 мкг-ат/л). В составе биогенных элементов доля нитратов в среднем составляет 82±8 %. Минимальная доля нитратов в составе биогенных элементов наблюдалась в 10 км от г. Мурманска в октябрьские снегопады 2019 г. (менее 25 %). Высокая концентрация нитратов (более 85 мкг-ат/л) характерна для декабрьских, январских, февральских и

апрельских снегопадов (табл. 3, рис. 4). В целом осенью (октябрь–ноябрь) и весной (март–май) количество нитратов в свежеснегоснеге значительно ниже, чем зимой. В 2019–2021 годах среднегодовые концентрации нитратов в свежеснегоснеге постепенно увеличивались, но их отличия не достоверны (рис. 5).

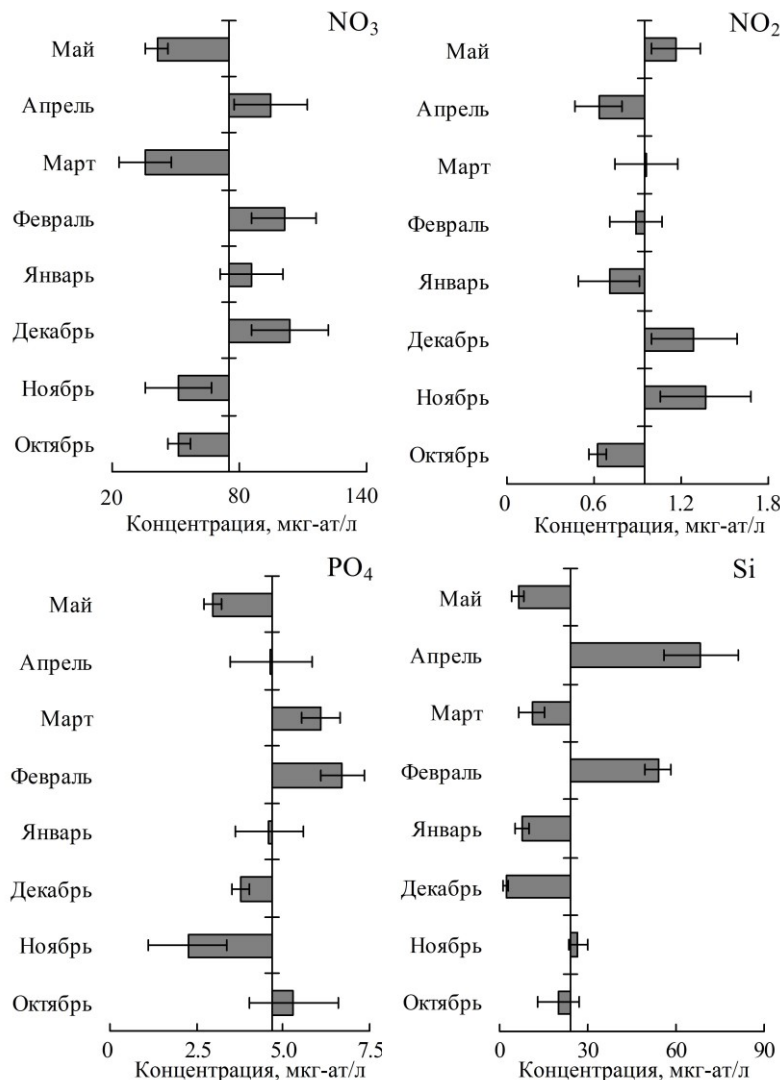


Рис. 4. Среднемесячные концентрации биогенных элементов в талой снеговой воде
Fig. 4. Mean monthly concentrations of biogenic elements in melted snow water

Концентрация нитритов в талой снеговой воде колебалась от 0.05 до 4.9 мкг-ат/л, в среднем – 1.02 ± 0.14 мкг-ат/л ($n = 92$). Максимальная концентрация нитритов отмечена в 20 км от города – в среднем составляя 2.06 ± 0.02 мкг-ат/л ($n = 12$), а минимальная в 10 км от города – 0.66 ± 0.12 мкг-ат/л ($n = 24$). Содержание нитритов в талой снеговой воде в 2019 г. было аномально высоким на всей исследованной территории (в среднем – 1.50 ± 0.19 мкг-ат/л, $n = 28$). Во все другие периоды наблюдений концентрация нитритов была менее 1 мкг-ат/л (рис. 3). В составе биогенных элементов доля нитритов в среднем составляет 2.0 ± 0.4 %, минимальная доля нитритов (< 0.1 %) наблюдалась в октябрьские снегопады 2019 г. по всей площади исследования. В течение холодного периода года высокие концентрации нитритов в талой снеговой воде постоянно отмечались в ноябрьские и декабрьские снегопады (табл. 3). В целом можно выделить два квазицикла – с октября по январь и с

января по апрель (в обоих циклах вначале наблюдается рост концентрации нитритов с последующим их снижением; рис. 4). В целом отмечено постепенное увеличение среднегодовых концентраций нитритов, в 2019 г. они были аномально высокими (рис. 5).

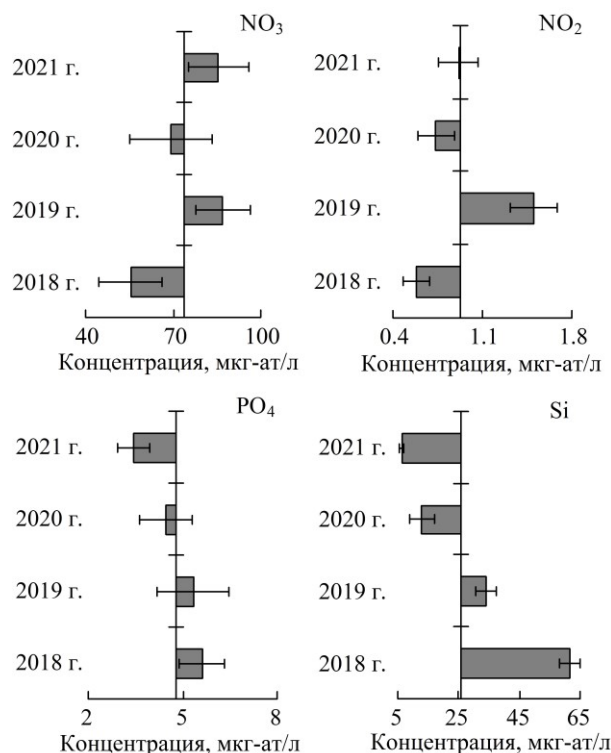


Рис. 5. Среднегодовые концентрации биогенных элементов в талой снеговой воде
Fig. 5. Average annual concentrations of nutrients in melted snow water

В талой снеговой воде содержание фосфатов изменялось от 0.4 до 18.3 мкг-ат/л (в среднем – 4.64 ± 0.67 мкг-ат/л, $n = 92$). Максимальные концентрации фосфатов наблюдались в г. Мурманске – в среднем составляя 5.37 ± 0.90 мкг-ат/л ($n = 54$), а минимальные в 20 км от города – 1.74 ± 0.73 мкг-ат/л ($n = 12$). Количество фосфатов в талой снеговой воде уменьшалось с 2018 г. (5.62 ± 1.31 мкг-ат/л) по 2021 г. (3.45 ± 0.51 мкг-ат/л). В составе биогенных элементов доля фосфатов в среднем составляла 9.3 ± 2.1 %, но в отдельные снегопады достигала 63 %. Минимальная доля фосфатов (< 1 %) наблюдалась в ноябрьские снегопады 2019 г., максимальная – в ноябрьские 2018 г. и январские 2019 г. (> 60 %). В течение холодного периода года концентрация фосфатов характеризуется одним циклом – с ноября по февраль она увеличивается, а с февраля по май снижается (табл. 3, рис. 4). В целом наблюдается постепенное снижение среднегодовых концентраций фосфатов (рис. 5).

Количество минерального кремния изменялось от 1 до 335 мкг-ат/л (в среднем – 25 ± 5 мкг-ат/л, $n = 92$). Максимальные концентрации силикатов наблюдались в г. Мурманске – в среднем составляя 28 ± 2 мкг-ат/л ($n = 54$), а минимальные – в 20 км от города – 10 ± 1 мкг-ат/л ($n = 27$). Содержание силикатов в снеге постоянно снижалось с 2018 по 2021 гг. В составе биогенных элементов доля силикатов в среднем составляет 27 ± 5 %, максимальная доля отмечена в январские и февральские снегопады 2019 г. в г. Мурманске (> 80 %). Постоянно высокие концентрации минерального кремния (более 50 мкг-ат/л, $n = 14$) наблюдались в февральские и апрельские снегопады, низкие – в декабрьские, январские и майские снегопады (менее 10 мкг-ат/л, $n = 12$; рис. 4, табл. 3). В целом наблюдается постепенное снижение среднегодовых концентраций силикатов (рис. 5).

Таким образом, в составе свежевыпавшего снега присутствуют биогенные элементы, по концентрации сопоставимые с количеством этих элементов в прибрежных баренцевоморских

водах в период предшествующий активной вегетации (Контроль ..., 1988). В составе биогенных элементов преобладают минеральные формы азота (особенно нитраты) и лишь в отдельные снегопады содержание минеральных форм кремния и фосфора больше, чем суммарное содержание соединений азота.

Следует отметить, что в г. Мурманске и его окрестностях в твердых атмосферных осадках концентрация биогенных элементов слабо изменяется во времени, коэффициент вариации не превышает 5 %. При этом, начиная с 2018 г., концентрация минеральных форм азота увеличивается, а фосфора и кремния уменьшается.

Концентрация органического вещества в свежеснежившем снеге. Количество органического вещества (ОВ) в талой снеговой воде в г. Мурманске и его окрестностях изменялось от 0.75 до 64.8 мг/л (в среднем – 21.2 ± 2.2 мг/л, мода – 14.2 мг/л, медиана – 17.7 мг/л, $n = 92$) при одномодальном распределении. Фоновый диапазон концентраций ОВ в талой снеговой воде составлял 13–28 мг/л.

В течение четырех лет в талой снеговой воде среднегодовые концентрации ОВ не имели достоверных отличий (табл. 4), но в 2020 г. они несколько превышали среднееголетний показатель (рис. 6а). Аномально высокие концентрации ОВ (более 25 мг/л) постоянно наблюдались в февральские и апрельские снегопады, а аномально низкие (менее 15 мг/л) – в ноябрьские и майские снегопады (рис. 6б).

Таблица 4
Среднегодовая концентрация органического вещества в свежеснежившем снеге, мг/л
Table 4
Average annual concentration of organic matter in freshly fallen snow, mg/l

Район	2018 г.	2019 г.	2020 г.	2021 г.
Г. Мурманск	23.0 ± 1.0 ($n = 2$)	23.6 ± 2.9 ($n = 18$)	27.2 ± 4.2 ($n = 14$)	18.6 ± 1.7 ($n = 18$)
10 км от города	26.0 ± 1.6 ($n = 6$)	11.8 ± 1.8 ($n = 6$)	17.8 ± 2.1 ($n = 6$)	32.6 ± 2.4 ($n = 8$)
20 км от города	12.2 ± 2.8 ($n = 3$)	24.3 ± 1.6 ($n = 3$)	13.0 ± 2.3 ($n = 6$)	14.0 ± 1.5 ($n = 3$)

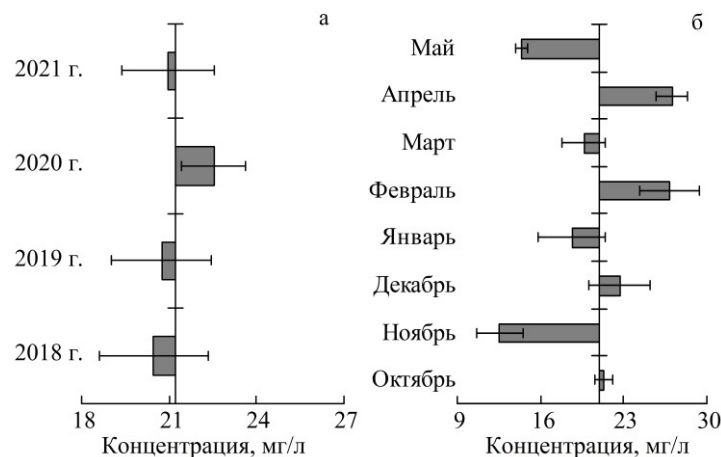


Рис. 6. Среднегодовые (а) и среднемесячные (б) концентрации органического вещества в свежеснежившем снеге
Fig. 6. Average annual (a) and average monthly (b) concentration of organic matter in freshly fallen snow

Непосредственно в г. Мурманске концентрация ОВ изменялась от 0.75 до 64.8 мг/л, в среднем составляя 22.2 ± 3.2 мг/л ($n = 54$). В течение трех лет количество ОВ в снеге в г. Мурманске увеличивалось, но в 2021 г. резко снизилось (табл. 4). В 10 км от города концентрация ОВ изменялась от 2.5 до 48.5 мг/л (в среднем – 21.4 ± 3.4 мг/л, $n = 26$). После резкого снижения в 2019 г. (по сравнению с 2018 г.) она стала увеличиваться, и в 2021 г. превысила среднееголетнее значение в 1.5 раза (табл. 4). В 20 км от города количество ОВ изменялось от 1.5 до 36.8 мг/л (в среднем –

15.6±6 мг/л, n = 12). В целом в 20 км от города концентрация ОВ достаточно стабильна и только в 2019 г. ее значения были аномально высокими (в 1.5 раза больше среднееголетних; табл. 4).

Установлено, что в течение холодного периода года высокие концентрации ОВ в свежеснеговом снеге постоянно наблюдаются в октябрьские (21.2±0.8 мг/л, n = 7), декабрьские (22.6±2.6 мг/л, n = 10), февральские (26.8±2.5 мг/л, n = 20) и апрельские (27.0±1.3 мг/л, n = 10) снегопады. Низкие – в ноябрьские (12.6±1.9 мг/л, n = 12) и майские (14.4±1.0 мг/л, n = 4) снегопады (рис. 6б). Среднее количество ОВ в январские снегопады – 18.6±2.8 мг/л (n = 18), в мартовские – 19.6±1.8 мг/л (n = 12).

Таким образом, в составе свежеснегового снега присутствует ОВ, концентрация которого превышает летне-осеннее содержание растворенного $C_{орг}$ в водах, льдах и снеге Баренцева моря (Агатова и др., 2007), но оно сопоставимо с количеством растворенного ОВ в Белом море (Комплексные ..., 2004; Система ..., 2012).

Следует отметить, что в г. Мурманске и его окрестностях концентрация ОВ в твердых атмосферных осадках имеет сильную отрицательную связь с концентрацией биогенных элементов (–0.958 – коэффициент ранговой корреляции).

Концентрация полимерных частиц в свежеснеговом снеге. В твердых атмосферных осадках постоянно присутствовали волокна и фрагменты различных полимеров. В связи с особенностями методической работы мы разделили полимерные волокна на 2 группы – макро- (длина более 1 мм) и микроволокна (длина менее 1 мм). Макроволокна встречались всех цветов (в том числе бесцветные и прозрачные), их длина достигала 7 см (в среднем – 3±0.3 см, n = 1350). Средняя длина микроволокон составляла 757±34 мкм (медиана – 738, мода – 779, n = 3400), в связи с окрашиванием фильтров изначальный цвет микроволокон определить невозможно. Толщина всех волокон изменялась от 5 до 20 мкм (в среднем – 16±0.3 мкм, n = 4750).

Среднее количество макроволокон в талой снеговой воде в г. Мурманске и его окрестностях составляло 29±4 нити/л (n = 48), среднее количество микроволокон – 638±134 нити/л (n = 48). При удалении от Мурманска количество всех полимерных волокон в свежеснеговом снеге уменьшается (табл. 5), при этом количество макроволокон в 1 л талой снеговой воды почти в 20 раз меньше, чем количество микроволокон (таблицы 5, 6). Аномально большое количество полимерных волокон в твердых атмосферных осадках наблюдалось в мартовские снегопады 2021 г., в декабрьские и январские снегопады оно значительно ниже средних показателей (табл. 6). В целом в течение холодного периода года количество полимерных волокон в твердых атмосферных осадках увеличивалось и только в апреле их количество резко снижалось (табл. 6). Необходимо отметить, что количество полимерных волокон в г. Мурманске и его окрестностях меньше, чем среднее их количество на севере Кольского полуострова (Митяев и др., 2022), это может свидетельствовать о том, что городская инфраструктура не является их поставщиком в атмосферу.

Таблица 5

Содержание полимерных частиц в свежеснеговом снеге в 2020–2021 гг.

Table 5

Number of polymer particles in freshly fallen snow in 2020–2021

Район	Количество волокон, нитей/л		Количество фрагментов, частиц/л
	длина > 1 мм	длина < 1 мм	
Г. Мурманск	33±4	710±56	9436±1963
10 км от города	23±2	592±23	8507±891
20 км от города	26±2	517±72	5878±672

Максимальный размер изометричных полимерных фрагментов 700 мкм, средний диаметр – 62±2 мкм (медиана – 59 мкм, мода – 64 мкм, n = 31000). Количество полимерных фрагментов в 1 л талой снеговой воды в среднем составляло 7766±1401 частиц, что на порядок больше чем количество полимерных волокон. Максимальное количество полимерных фрагментов в твердых атмосферных осадках наблюдалось в февральские и апрельские снегопады (табл. 6). При удалении от г. Мурманска количество полимерных фрагментов в свежеснеговом снеге уменьшается (табл. 5). При этом в 10 км

от города эти различия незначительны и недостоверны, в 20 км от города они достоверны, а их среднее значение не отличается от среднего количества полимерных фрагментов в свежеснеге на севере Кольского полуострова (Митяев и др., 2022). Вероятно, в городской инфраструктуре есть источник поступления полимерных фрагментов в атмосферу.

Таблица 6

Содержание полимерных частиц в свежеснеге в 2020–2021 гг.

Table 6

Number of polymer particles in freshly fallen snow in 2020–2021

Время наблюдений	Количество волокон, нитей/л		Количество фрагментов, частиц/л
	длина > 1 мм	длина < 1 мм	
Декабрь 2020 г.	50±2	291±27	2634±760
Январь 2021 г.	42±3	371±24	7567±851
Февраль 2021 г.	25±4	708±119	10043±796
Март 2021 г.	23±8	947±54	6281±371
Апрель 2021 г.	18±5	491±57	10913±678

Заключение

В ходе исследований мы дополнительно получили три важных (с точки зрения авторов) результата. Остановимся на них.

В Мурманске и его окрестностях вещественный состав твердых нерастворимых частиц представлен тремя компонентами. Во-первых, резко преобладают (всегда более 50 %) частицы техногенного происхождения (сферы сгорания, зола, угольная пыль, микропластик). Во-вторых, в большом количестве встречаются мелкие неопределимые частицы (менее 1 мкм) различного цвета (желтых, зеленых, розовых тонов, белой или светло-серой окраски, а также прозрачные и бесцветные частицы). В-третьих, отмечены частицы природного происхождения (волокна и обрывки органического вещества; обломки минералов, в основном чешуйки слюд, изредка кварц и полевые шпаты).

Установлено, что концентрация нерастворимых частиц возрастает при увеличении плотности свежеснега ($r = 0.739$, $n = 54$), но эта зависимость сохраняется только в сухом пушистом снеге (плотность < 0.20 г/см³). В мокром плотном снеге (плотность > 0.20 г/см³) концентрация нерастворимых частиц уменьшается при увеличении плотности снега ($r = -0.898$, $n = 42$). Возможно несколько механизмов уменьшения концентрации аэрозольных частиц в мокром снеге:

- 1) кристаллы плотного (мокрого) снега обладают меньшей (по сравнению с пушистым снегом) способностью захватывать твердые аэрозольные частицы из атмосферы;
- 2) вымывание твердых частиц из мокрого снега в ходе прохождения его кристаллов через высокие слои атмосферы;
- 3) фильтрация твердых частиц из свежеснега в почвы после выпадения его на земную поверхность.

В зимний период резко преобладают два направления поступления воздушных масс на Мурманское побережье – с морской стороны (с севера и северо-запада) и со стороны континента (с юга и юго-запада). В первом случае воздушные массы пересекают Баренцево и Норвежское моря, во втором – Кольский полуостров, центральную и северную Финляндию. Воздушные массы с континента приносили твердые атмосферные осадки, содержавшие в себе повышенные концентрации нерастворимых частиц тяжелых металлов (Нерастворимые ..., 2019; рис. 7), микропластика (Митяев и др., 2022) и органического вещества, по сравнению с воздушными массами, поступающими со стороны Баренцева моря. Только концентрация биогенных элементов не имеет четкой связи с переносом воздушных масс, что, вероятно, связано с близостью незамерзающего моря.

Итак, подводя итог, отметим главное. В зимней атмосфере над г. Мурманском и его окрестностях находится повышенное количество твердых нерастворимых частиц, включая тяжелые металлы, микропластик и черный углерод (угольная пыль, сферы сгорания, сажа). С большой долей вероятности городская инфраструктура является поставщиком части этих веществ, так как при

удалении от города концентрация большинства этих элементов снижается. При этом важную роль в повышенных концентрациях нерастворимых аэрозолей над городом играют ветры южных румбов.

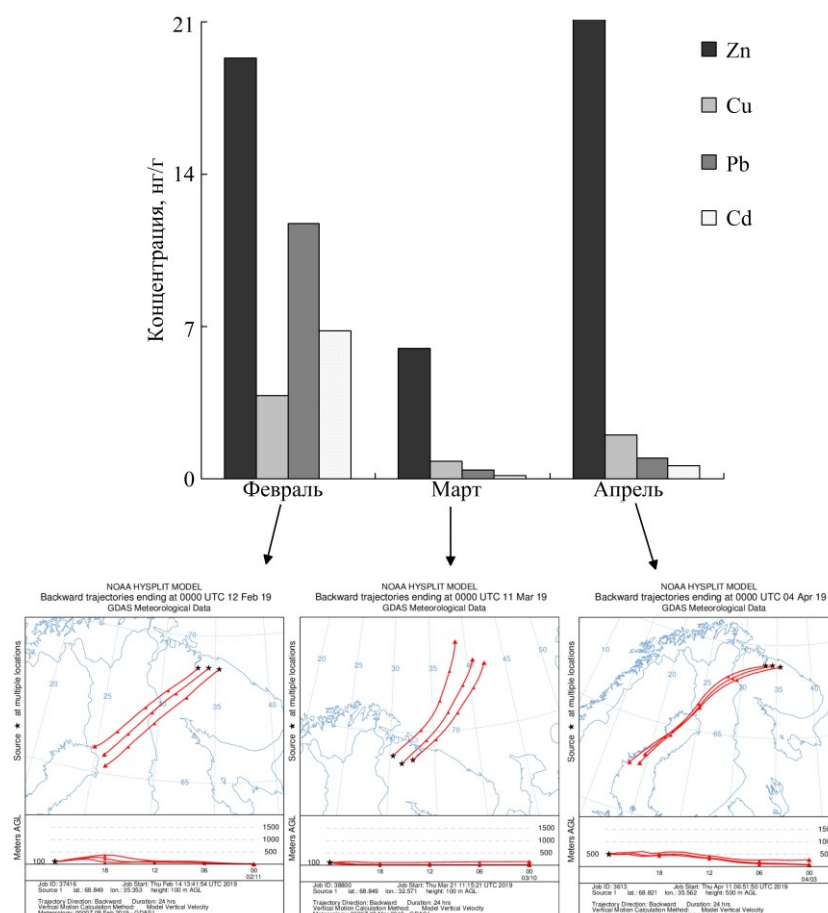


Рис. 7. Изменение концентрации тяжелых металлов в свежеснеге в зависимости от траектории переноса воздушных масс в 2019 г. В нижней части – обратные траектории переноса воздушных масс по модели NOAA HYSPLIT на высоте 500 м над уровнем моря

Fig. 7. Changes in the concentration of heavy metals in freshly fallen snow depending on the trajectory of air mass transfer 2019. In the lower part, reverse trajectories of air mass transfer according to the NOAA HYSPLIT model at an altitude of 500 m above sea level

Работа выполнена по теме “Планктонные сообщества арктических морей в условиях современных климатических изменений и антропогенного воздействия” (№ госрегистрации 121091600105-4) в рамках государственного задания ММБИ РАН.

Список литературы

1. Агатова А. И., Лапина Н. М., Торгунова Н. И. Органическое вещество Баренцева моря // Арктика и Антарктика. 2007. Вып. 5(39). С. 156–174.
2. Аэрозоли в природных ландшафтах Сибири / А. П. Бояркина, В. В. Байковский, Н. В. Васильев, Г. Г. Глухов, М. А. Медведев, Л. Ф. Писарева, В. И. Резчиков, С. И. Шелудько. Томск: Изд-во Том. гос. ун-та, 1993. 157 с.
3. Аэрозоли Арктики – результаты десятилетних исследований / В. П. Шевченко, А. П. Лисицын, А. А. Виноградова, В. В. Смирнов, В. В. Серова, Р. Штайн // Оптика атмосферы и океана. 2000. Т. 13, № 6/7. С. 551–576.
4. Аэрозоли Арктики и их влияние на окружающую среду / В. П. Шевченко, А. П. Лисицын, А. А. Виноградова, К. П. Куценогий, В. В. Смирнов, Р. Штайн // Аэрозоли Сибири. Новосибирск: Изд-во Сиб. отд. РАН, 2006. С. 148–184.

5. *Виноградова А. А., Полиссар А. В.* Элементный состав аэрозоля в атмосфере центральной части российской Арктики // Изв. РАН. Сер. “Физика атмосферы и океана”. 1995. Т. 32. С. 264–274.
6. *Евсеев А. В., Красовская Т. М.* Эколого-географические особенности природной среды районов Крайнего Севера России. Смоленск: Изд-во СГУ, 1996. 232 с.
7. Исследования нерастворимых частиц в снежном покрове Западной Сибири на профиле от Томска до эстуария Оби / В. П. Шевченко, С. Н. Воробьев, С. Н. Кирпотин, И. В. Крицков, Р. М. Монасыпов, О. С. Покровский, Н. В. Политова // Оптика атмосферы и океана. 2015. Т. 28, № 6. С. 499–504.
8. Комплексные океанографические исследования в Белом море в апреле 2003 г. / К. Н. Кособокова, А. Н. Пантюлин, А. Рахор, Т. Н. Ратькова, В. П. Шевченко, А. И. Агатова, Н. М. Лапина, А. А. Белов // Океанология. 2004. Т. 44, № 2. С. 313–314.
9. Контроль экологической ситуации в районе опытно-промышленной плантации водорослей в губе Дальнезеленецкой (оперативно-информационный материал) / Отв. ред. В. С. Петров. Апатиты: Изд. КФ АН СССР, 1988. 52 с.
10. *Куценогий К. П., Куценогий П. К.* Аэрозоли Сибири. Итоги семилетних исследований // Сиб. экол. журн. 2000. № 1. С. 11–20.
11. *Митяев М. В.* Мурманское побережье (геолого-геоморфологические и климатические особенности, современные геологические процессы). Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2014. 226 с.
12. *Митяев М. В., Дружкова Е. И., Герасимова М. В.* Частицы синтетических полимеров в свежес выпавшем снеге на северо-западе Кольского полуострова в 2020–2021 гг. // Проблемы Арктики и Антарктики. 2022. Т. 68, № 3. С. 308–323. URL: <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-3-308-323>
13. Нерастворимые фракции аэрозолей и тяжелых металлов в свежес выпавшем снеге на северо-западе Кольского полуострова в 2018 г. / М. В. Митяев, М. В. Герасимова, И. В. Рыжик, Т. Г. Ишкулова // Лед и снег. 2019. Т. 59, № 3. С. 307–318. DOI: 10.15356/2076-6734-2019-3-386
14. Оценка современного состояния природной среды: Норильский промышленный район / В. М. Игамбердиев, О. М. Терешенков, Х. А. Кутыев, Е. Н. Попова // Народное хозяйство Республики Коми. 1994. № 1. С. 54–61.
15. Распределение и состав нерастворимых частиц в снеге Арктики / В. П. Шевченко, А. П. Лисицын, Р. Штайн, Н. В. Горюнова, А. А. Клювиткин, М. Д. Кравчишина, М. Кривс, А. Н. Новигацкий, В. Т. Соколов, А. С. Филиппов, Х. Хаас // Проблемы Арктики и Антарктики. 2007. № 1(75). С. 106–118.
16. Руководство по химическому анализу морских вод. СПб.: Гидрометеиздат, 1993. 264 с.
17. Руководство по химическому анализу морских и пресных вод при экологическом мониторинге рыбохозяйственных водоемов и перспективных для промысла районов Мирового океана / Под ред. В. В. Сапожникова. М.: Изд-во ВНИРО, 2003. 202 с.
18. Система Белого моря. Водная толща и взаимодействующие с ней атмосфера, криосфера, речной сток и биосфера. М.: Научный мир, 2012. Т. 2. 784 с.
19. Современные методы гидрохимических исследований океана / Ред. О. К. Бордовский, А. М. Чернякова. М.: Ин-т океанологии РАН, 1992. 199 с.
20. Химический состав снежного покрова как показатель загрязнения на Кольском полуострове / Е. Л. Болтенко, А. В. Евсеев, А. В. Корзун, Т. Г. Сухова // Вестн. Моск. гос. ун-та. Сер. 5. География. 1991. № 5. С. 60–64.
21. *Чернов Р. А.* Метаморфизм и термические свойства свежес выпавшего снега (по исследованиям в Подмосковье) // Лед и снег. 2016. Т. 56, № 2. С. 199–206.
22. *Шевченко В. П.* Влияние аэрозолей на среду и морское осадконакопление в Арктике. М.: Наука, 2006. 226 с.
23. Arctic sea ice is an important temporal sink and means of transport for microplastic / I. Peeken, S. Primpke, B. Beyer, J. Gutermann, C. Katlein, T. Krumpfen, M. Bergmann, L. Hehemann, G. Gerdtts // Nature Communications. 2018. Vol. 9. 1505 p.
24. Microplastic contamination in an urban area: a case study in greater Paris / R. Dris, J. Gasperi, V. Rocher, M. Saad, N. Renault, B. Tassin // Env. Chemistry. 2015. Vol. 12. 592 p. URL: <https://doi.org/10.1071/en14167>
25. Snow composition in eight catchments in the Central Barents Euro-Arctic region / P. Caritat, M. Dyrds, H. Niskavaara, V. Chekushin, I. Bogatyrev, C. Reimann // Atmospheric Env. 1998. Vol. 32, № 14/15. P. 2609–2626.
26. *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. Vol. 114. P. 377–394.

References

1. Agatova A. I., Lapina N. M., Torgunova N. I. Organicheskoe veshchestvo Barentseva morya [Organic matter of the Barents Sea]. *Arktika i Antarktika* [Arctic and Antarctic], 2007, Issue 5(39), pp. 156–174. (In Russ.)

2. Boyarkina A. P., Bajkovskij V. V., Vasil'ev N. V., Gluhov G. G., Medvedev M. A., Pisareva L. F., Rezchikov V. I., Shelud'ko S. I. *Aerozoli v prirodnyh planshetah Sibiri* [Aerosols in natural tablets of Siberia]. Tomsk: Publ. Tomsk State University, 1993, 157 p. (In Russ.).
3. Shevchenko V. P., Lisicyn A. P., Vinogradova A. A., Smirnov V. V., Serova V. V., Shtajn R. Aerozoli Arktiki – rezul'taty desyatiletnih issledovanij [Arctic aerosols – the results of ten years of research]. *Optika atmosfery i okeana* [Optics of the atmosphere and ocean], 2000, Vol. 13, No. 6/7, pp. 551–576. (In Russ.)
4. Shevchenko V. P., Lisicyn A. P., Vinogradova A. A., Kucenogij K. P., Smirnov V. V., Shtajn R. Aerozoli Arktiki i ih vliyanie na okruzhayushchuyu sredu [Arctic aerosols and their impact on the environment]. *Aerozoli Sibiri* [Aerosols of Siberia], Novosibirsk, Publ. Siberian Branch RAS, 2006, pp. 148–184. (In Russ.).
5. Vinogradova A. A., Polissar A. V. Elementnyj sostav aerolya v atmosfere central'noj chasti rossijskoj Arktiki [Elemental composition of aerosol in the atmosphere of the central part of the Russian Arctic]. *Izvestiya RAN. Seriya "Fizika atmosfery i okeana"* [News of the Russian Academy of Sciences. Series "Physics of the atmosphere and Ocean"], 1995, Vol. 32, pp. 264–274. (In Russ.).
6. Evseev A. V., Krasovskaya T. M. *Ekologo-geograficheskie osobennosti prirodnoj sredy rajonov Krajnego Severa Rossii* [Ecological and geographical features of the natural environment of the regions of the Far North of Russia]. Smolensk, Publ. Smolensk State University, 1996, 232 p. (In Russ.).
7. Shevchenko V. P., Vorob'ev S. N., Kirpotin S. N., Krickov I. V., Monasypov R. M., Pokrovskij O. S., Politova N. V. Issledovaniya nerastvorimyh chastic v snezhnom pokrove Zapadnoj Sibiri na profile ot Tomska do estuariya Obi [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, Vol. 28, No. 6, pp. 499–504. (In Russ.).
8. Kosobokova K. N., Pantyulin A. N., Rahor A., Rat'kova T. N., Shevchenko V. P., Agatova A. I., Lapina N. M., Belov A. A. Kompleksnye okeanograficheskie issledovaniya v Belom more v aprele 2003 g [Comprehensive oceanographic research in the White Sea in April 2003]. *Okeanologiya* [Oceanology], 2004, Vol. 44, No. 2, pp. 313–314. (In Russ.).
9. Averintsev V. G., Baytaz V. A., Baytaz O. N., Bardan S. I., Kondakov A. V., Kuznetsov L. L., Moskvina M. I., Pesegov V. G., Sikorsky A. A., Fomin O. K., Chirkova Z. N., Shirokolobov V. N. *Kontrol' ekologicheskoy situatsii v rajone opytно-promyshlennoj plantatsii vodoroslej v gube Dal'nezelenekoj (operativno-informacionnyj material)* [Control of the ecological situation in the area of the experimental-industrial algae plantation in the bay of Dalnezelenetskaya (operational information material)]. Apatity, Publ. of the Kola Branch of the USSR Academy of Sciences, 1988, 52 p. (In Russ.).
10. Kucenogij K. P., Kucenogij P. K. Aerozoli Sibiri. Itogi semiletnih issledovanij [Aerosols of Siberia. Results of seven years of research]. *Sibirskiy ekologicheskij zhurnal* [Siberian Ecological Journal], 2000, No. 1, pp. 11–20. (In Russ.).
11. Mityaev M. V. *Murmanskoe poberezh'e (geologo-geomorfologicheskie i klimaticheskie osobennosti, sovremennye geologicheskie processy)* [Murmansk coast (geological, geomorphological and climatic features, modern geological processes)]. Apatity, Publ. KSC RAS, 2014, 226 p. (In Russ.).
12. Mityaev M. V., Druzhkova E. I., Gerasimova M. V. Chasticy sinteticheskikh polimerov v svezhevypavshem snege na severo-zapade Kol'skogo poluostrova v 2020–2021 gg. [Particles of synthetic polymers in freshly fallen snow in the north-west of the Kola Peninsula in 2020–2021]. *Problemy Arktiki i Antarktiki* [Problems of the Arctic and Antarctic], 2022, Vol. 68, No. 3, pp. 308–323. Available at: <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-3-308-323> (In Russ.).
13. Mityaev M. V., Gerasimova M. V., Ryzhik I. V., Ishkulova T. G. Nerastvorimye frakcii aerolej i tyazhelyh metallov v svezhevypavshem snege na severo-zapade Kol'skogo poluostrova v 2018 g [Insoluble fractions of aerosols and heavy metals in freshly fallen snow in the north-west of the Kola Peninsula in 2018]. *Led i sneg* [Ice and snow], 2019, Vol. 59, No. 3, pp. 307–318. DOI: 10.15356/2076-6734-2019-3-386 (In Russ.).
14. Igamberdiev V. M., Tereshenkov O. M., Kutjev H. A., Popova E. N. Ocenka sovremennogo sostoyaniya prirodnoj sredy: Noril'skij promyshlennyy rajon [Assessment of the current state of the natural environment: Norilsk Industrial district]. *Narodnoe hozyajstvo Respubliki Komi* [The national economy of the Komi Republic], 1994, No. 1, pp. 54–61. (In Russ.).
15. Shevchenko V. P., Lisicyn A. P., Shtajn R., Goryunova N. V., Klyuvitkin A. A., Kravchishina M. D., Krivs M., Novigackij A. N., Sokolov V. T., Filippov A. S., Haas H. Raspredelenie i sostav nerastvorimyh chastic v snege Arktiki [Distribution and composition of insoluble particles in Arctic snow]. *Problemy Arktiki i Antarktiki* [Problems of the Arctic and Antarctic], 2007, No. 1(75), pp. 106–118. (In Russ.).
16. *Rukovodstvo po himicheskomu analizu morskikh vod* [Guidelines for chemical analysis of marine waters]. Saint-Petersburg, Gidrometeoizdat, 1993, 264 p. (In Russ.).

17. *Rukovodstvo po himicheskomu analizu morskikh i presnykh vod pri ekologicheskom monitoringe rybohozyajstvennykh vodoemov i perspektivnykh dlya promysla rajonov Mirovogo okeana* [Guidelines for chemical analysis of marine and fresh waters in environmental monitoring of fishery reservoirs and areas of the World Ocean that are promising for fishing], Moscow, Publ. VNIRO, 2003, 202 p. (In Russ.).
18. *Sistema Belogo morya. Vodnaya tolshcha i vzaimodejstviyushchie s nej atmosfera, kriosfera, rechnoj stok i biosfera* [The White Sea system. The water column and the atmosphere interacting with it, the cryosphere, river runoff and the biosphere]. Moscow, Scientific World Publishing House, 2012, Vol. 2, 784 p. (In Russ.).
19. *Sovremennye metody gidrohimicheskikh issledovanij okeana* [Modern methods of hydrochemical ocean research]. Moscow, Institut Oceanology RAS, 1992, 199 p. (In Russ.).
20. Boltenko E. L., Evseev A. V., Korzun A. V., Suhova T. G. Himicheskij sostav snezhnogo pokrova kak pokazatel' zagryazneniya na Kol'skom poluostrove [Chemical composition of snow cover as an indicator of pollution on the Kola Peninsula]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. 5. Geografiya* [Bulletin of the Moscow State University. Geography Series], 1991, No. 5, pp. 60–64. (In Russ.).
21. Chernov R. A. Metamorfizm i termicheskie svojstva svezhevypavshogo snega (po issledovaniyam v Podmoskov'e) [Metamorphism and thermal properties of freshly fallen snow (according to research in the Moscow region)]. *Led i sneg* [Ice and snow], 2016, Vol. 56, No. 2, pp. 199–206. (In Russ.).
22. Shevchenko V. P. *Vliyanie aerorozlej na sredu i morskoe osadkonakoplenie v Arktike* [The effect of aerosols on the environment and marine sedimentation in the Arctic]. Moscow, Science, 2006, 226 p. (In Russ.).
23. Peeken I., Primpke S., Beyer B., Gutermann J., Katlein C., Krumpfen T., Bergmann M., Hehemann L., Gerdt G. Arctic sea ice is an important temporal sink and means of transport for microplastic. *Nature Communications*, 2018. Vol. 9, 1505 p.
24. Dris R., Gasperi J., Rocher V., Saad M., Renault N., Tassin B. Microplastic contamination in an urban area: a case study in greater Paris. *Environmental chemistry*, 2015, Vol. 12, 592 p. Available at: <https://doi.org/10.1071/en14167>
25. 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, Vol. 32, No. 14/15, pp. 2609–2626.
26. 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, Vol. 114, pp. 377–394.

Информация об авторе

Максим Валентинович Митяев – кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник
<https://orcid.org/0000-0003-3059-6469>

Марина Васильевна Герасимова – кандидат географических наук, старший научный сотрудник,
<https://orcid.org/0000-0002-2273-617X>

Елена Ивановна Дружкова – кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник,
<https://orcid.org/0000-0002-7891-0800>

Татьяна Геннадьевна Ишкулова – научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-6777-6693>

Мария Юрьевна Меньшакова – кандидат биологических наук, доцент, <https://orcid.org/0000-0003-0441-668X>

Information about the author

Maksim V. Mityaev – PhD (Geology and Mineralogy), Senior Researcher, <https://orcid.org/0000-0003-3059-6469>

Marina V. Gerasimova – PhD (Geography), Senior Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-2273-617X>

Elena I. Druzhkova – PhD (Biology), Leading Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-7891-0800>

Tatyana G. Ishkulova – Research Associate, <https://orcid.org/0000-0002-6777-6693>

Maria Yu. Menshakova – PhD (Biology), Assistant Professor, <https://orcid.org/0000-0003-0441-668X>

Статья поступила в редакцию 04.04.2023; одобрена после рецензирования 13.04.2023; принята к публикации 17.04.2023.
The article was submitted 04.04.2023; approved after reviewing 13.04.2023; accepted for publication 17.04.2023.