

УДК 550.42

СОСТАВ ВЗВЕСИ В СНЕЖНОМ ПОКРОВЕ ЗАПАДНОГО СЕКТОРА РОССИЙСКОЙ АРКТИКИ

© 2024 г. Е. И. Котова*, Д. П. Стародымова, А. С. Лохов, О. П. Нецветаева

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

**e-mail: ecopp@yandex.ru*

Поступила 08.08.2024 г.

После доработки 11.09.2024 г.

Принята к печати 07.10.2024 г.

Исследован состав взвешенного вещества снежного покрова западного сектора Российской Арктики. Среднее содержание нерастворимого вещества в снеге района исследования составило 3.4 мг/л. Выявлены региональные особенности содержания элементов в нерастворимом веществе снега Кольского полуострова, севера Архангельской области и Ненецкого автономного округа. Определено влияние как природных, так и антропогенных факторов.

Ключевые слова: снежный покров, взвешенное вещество, металлы, Арктика

DOI: 10.31857/S2076673424040097, **EDN:** HTBZGJ

ВВЕДЕНИЕ

Арктика — зона накопления примесей, переносимых на большие расстояния (Lee et al., 2023). Районы за ее пределами могут вносить свой вклад в химический состав атмосферы и осадков, регистрируемых в этой зоне. Расположенные в Арктике антропогенные источники вносят дополнительный вклад в региональный уровень загрязнения. Воздушный перенос нередко самый быстрый путь поставки загрязняющих веществ, в том числе на удаленные от источников выбросов территории (Duce et al., 1991; Шевченко, 2006; Лисицын, 2011). Попадая в атмосферу, загрязняющие вещества переносятся воздушными потоками на разные расстояния и выпадают на подстилающую поверхность в результате «сухого» осаждения или вымываются атмосферными осадками, а как следствие увеличивают антропогенную нагрузку на наземные экосистемы (Голубева и др., 2010; Суркова и др., 2010; Stanek et al., 2011). Исследования процессов осадконакопления в Арктике и роли воздушного (эолового) переноса вещества (Шевченко, 2006; Система ..., 2012; Котова, Шевченко, 2014), в том числе изучение снежного покрова, являющегося природным архивом, показали значимую роль эолового материала в формировании осадочного материала в Арктике. Несмотря на актуальность данных исследований, недостаточно работ, охватывающих большие территории, а сравнение данных, полученных разными группами ученых затруднительно. Данная работа охватывает материковую часть

западного сектора Российской Арктики: Кольский полуостров, север Архангельской области, Ненецкий автономный округ, что позволяет оценить региональные особенности состава взвеси в снежном покрове.

В настоящее время важно понять, насколько арктические экосистемы подвержены воздействию антропогенной деятельности и каковы особенности такого воздействия в разных районах. Возможное изменение характера атмосферной циркуляции и интенсивности осадков вследствие происходящего потепления климата может усилить перенос и потоки поллютантов из атмосферы (Schiedek et al., 2007; Pouch, Zaborska, 2015; Souza-Kasprzyk et al., 2024).

Цель работы — исследование особенностей состава взвешенного вещества снежного покрова западного сектора Российской Арктики зимой 2022/23 г.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Пробы снежного покрова были отобраны на побережье Двинского, Онежского, Мезенского, Кандалакшского заливов Белого моря, территории Кольского полуострова, Ненецкого автономного округа, Беломорско-Кулойского плато, территории Сийского государственного природного биологического заказника регионального значения (Архангельская область), Пинежского государственного природного заповедника (Архангельская область)

(рис. 1). Точки отбора проб выбирали на ключевых участках, с учетом характерных ландшафтов. В качестве фоновых участков рассматривались удаленные от промышленных источников территории Сийского заказника (т. 18), Пинежского заповедника (т. 19), побережье Коровинской губы Печорского моря (Ненецкий заповедник) (т. 26).

Сбор взвешенного вещества, накопившегося в снежном покрове, проводился по методикам, принятым в практике изучения аэрозолей Арктики (Шевченко, 2000). Пробы отбирали из шурфа в период максимального снегонакопления (конец февраля – март) в 2023 г. в пластиковые герметично закрывающиеся ведра объемом 20 л с помощью

пластикового пробоотборника на всю глубину залегания (исключая самый нижний слой), с замером сторон и глубины шурфа. На каждой площадке отбора определяли высоту снежного покрова, влагозапас, плотность снега.

После отбора пробы снега доставляли в лабораторию Северо-Западного отделения Института океанологии им. П.П. Ширшова в неизменном виде (таяние проб исключалось). Предварительно пробы обрабатывали на территории Ненецкого автономного округа непосредственно в районах работ. Поступившие пробы растапливали при комнатной температуре, проводили замеры уровня pH и минерализации талой фазы снежного покрова с



Рис. 1. Схема расположения площадок отбора проб снега

1 – побережье Баренцева моря (район села Териберка), 2 – Ретинское, 3 – Лисья гора, 4 – Мончегорск, 5 – Тайбола, 6–7 – Апатиты, 8 – Кандалакшский залив, 9 – Кемь, 10 – Ворзогоры, 11 – Онежский залив, 12 – Кянда, 13 – Солза, 14 – Северодвинск, 15 – о. Ягры, 16 – устье Северной Двины, 17 – Беломорско-Кулойского плато, 18 – Сийский госу. природный биологический заказник регионального значения, 19 – Пинежский гос. природный заповедник, 20 – устье р. Мезень, 21 – устье р. Пеза, 22 – устье р. Пеша, 23 – устье р. Индига, 24–26 – устье р. Печора, 27–30 – болшеземельская тундра по маршруту Нарьян-Мар – пос. Харьягинский

Fig. 1. Scheme of positions of the sampling sites of snow

1 – Barents Sea coast (Teriberka village area), 2 – Retinskoe, 3 – Lisy Gora, 4 – Monchegorsk, 5 – Taibola, 6 – 7 – Apatity, 8 – Kandalaksha Bay, 9 – Kem, 10 – Vorzogory, 11 – Onega Bay, 12 – Kyanda, 13 – Solza, 14 – Severodvinsk, 15 – Yagry Island, 16 – estuary of the Northern Dvina River, 17 – Belomorsko-Kuloisky Plateau, 18 – Siisky State Natural Biological Reserve of regional importance, 19 – Pinezhsy State Natural Reserve, 20 – estuary of the Mezen River, 21 – estuary of the Peza River, 22 – estuary of the Pyosha River, 23 – estuary of the Indiga River, 24–26 – estuary of the Pechora River, 27–30 – Bolshezemelskaya tundra along the route Naryan-Mar – Kharyaginsky

использованием многопараметрического измерителя WTW ProfiLine Multi 3420 и далее фильтровали через предварительно взвешенные мембранные фильтры с диаметром пор 0.45 мкм. Фильтрацию проводили параллельно на трех мембранных фильтрах из полиэфирсульфона. Количество нерастворимого вещества определяли гравиметрическим методом. После фильтрации фильтры высушивали при температуре 55–60 °С до постоянного веса в эксикаторе. Образцы твердого вещества перед анализом были разложены с применением кислот. Определение элементного состава (содержание Li, Be, Al, Sc, Ti, V, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, Ge, As, Rb, Sr, Nb, Mo, Cd, Sb, Cs, Ba, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Y, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Pb, Bi, Th, U) проводили на масс-спектрометре с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-МС) Agilent 7500.

Статистический анализ данных включал расчет основных статистических показателей, построение матриц коэффициентов парной корреляции между концентрациями. Статистическая обработка результатов выполнена в программах Microsoft Office Excel.

Для определения вклада литогенного или иного источника в формирование элементного состава взвешенного вещества снега были рассчитаны коэффициенты обогащения (далее – КО) относительно среднего состава континентальной земной коры по формуле:

$$КО = \frac{\left(\frac{Эл}{Al}\right)_{\text{проба}}}{\left(\frac{Эл}{Al}\right)_{\text{з.к.}}}, \quad (1)$$

где Эл, Al – содержания химического элемента и алюминия в пробе и в верхней части континентальной земной коры (Rudnick, Gao, 2003).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Высота снежного покрова на рассматриваемой территории в 2023 г. изменялась в диапазоне от 11–52 см на открытых участках до 78–98 см в лесных массивах Архангельской области. Средняя высота снежного покрова на территории Мурманской и на открытых территориях Архангельской области была на уровне 32 см. На территории Ненецкого автономного округа среднее значение высоты снежного покрова было ниже и составило 19 см. Это обусловлено сильными ветрами на открытых территориях, которые способствуют переносу и уплотнению снега. Несмотря на то, что в среднем для территории России в зимний период 2022/23 г. максимальная высота снежного покрова оказалась ниже климатической нормы (Обзор..., 2024), на рассматриваемой территории значения высоты снежного покрова в момент отбора были

близки к средним многолетним значениям за период 1991–2000 гг.

Средние значения *плотности снега* составили 0.20 г/см³ для территории Архангельской области, 0.22 г/см³ – для Кольского полуострова и 0.25 г/см³ на территории Ненецкого автономного округа. Наибольшую плотность (0.37–0.46 г/см³) снежный покров имел на открытых прибрежных участках (Териберка, устье р. Печора), а также вблизи Мончегорска, вследствие ветрового уплотнения.

Уровень pH талой фазы снежного покрова на рассматриваемой территории изменялся в диапазоне 5.0–9.2 (рис. 2). Более щелочные свойства снежный покров имел в прибрежных районах Ненецкого автономного округа: в устье р. Индига (8.7–9.2) и в устьях рек Пеша и Печора (до 7.0). Это связано с влиянием морских вод, которые в устьевых областях рек способны просачиваться через лед и насыщать снежный покров морскими ионами (Котова и др., 2024). Помимо природного фактора увеличения уровня pH на территории НАО прослеживается также влияние антропогенной деятельности на данный показатель. Так, вблизи Харьгинского месторождения (т. 30) уровень pH талого снега увеличился до 7.2.

Более низкие значения уровня pH талого снега характерны для Мурманской области (5.5 в среднем), в том числе района Мончегорска (5.3). Пониженные значения pH обуславливают высокую растворимость металлов в снежном покрове на Кольском п-ове (Опекунов и др., 2021) и переход их из взвеси в талые воды.

Среднее содержание *нерастворимого вещества* в снеге для всего района исследования составило 3.4 мг/л, что соответствует значению для снега фоновых участков Арктики (Шевченко и др., 2007). Такое же значение получено и в среднем для рассматриваемой части Кольского полуострова. Чуть выше среднее содержание взвеси в снежном

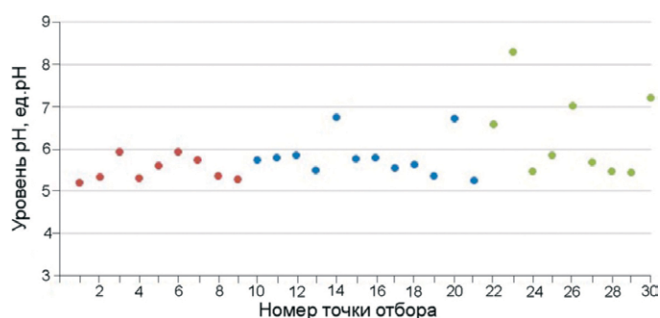


Рис. 2. Уровень pH талого снега. Номера точек совпадают с нумерацией на рис. 1

Fig. 2. pH of snow. Point numbers are the same as in Fig. 1

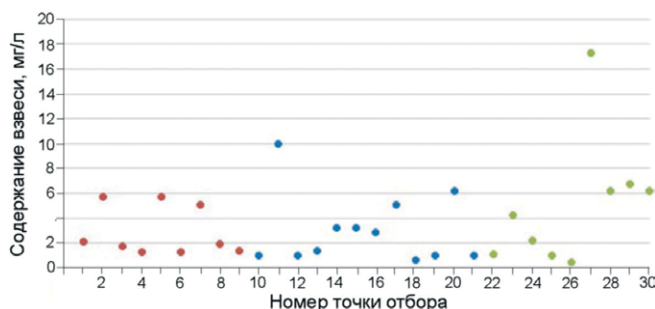


Рис. 3. Содержание взвеси в снеге, мг/л. Номера точек совпадают с нумерацией на рис. 1

Fig. 3. Suspended sediment in snow, mg/l. Point numbers are the same as in Fig. 1

покрова Архангельской области (3.6 мг/л) и Ненецкого автономного округа (3.9 мг/л).

На территории Кольского полуострова увеличение содержания взвешенного вещества в снеге отмечено на западном побережье Кольского залива (т. 2) — 5.7 мг/л (рис. 3). Одним из источников поступающей пыли является перегрузка угля в порту Мурманска. Увеличению нерастворимого вещества в снежном покрове до 5.1 мг/л (т. 5) способствует деятельность подразделений Кировского филиала АО «Апатит», расположенных в Кировске и Апатитах.

На большей части рассматриваемой территории Архангельской области содержание взвешенного вещества в снежном покрове находилось на уровне 1 мг/л. Повышенные значения концентрации взвеси были получены на восточном побережье Онежского залива (т. 11) вблизи выхода скальных пород: 10.0 мг/л (см. рис. 3). Причиной повышенного содержания нерастворимого вещества в устье р. Мезень (т. 20) — 6.2 мг/л (см. рис. 3), служит поступление взвеси из горных пород, слагающих высокие берега реки, обнаженные даже в зимний период. Антропогенный источник поступления взвешенного вещества на территории Архангельской области — это разработка месторождение алмазов им. М.В. Ломоносова (Шурко, 2024), но его влияние явно прослеживается только вблизи самого месторождения. В 2023 г. вблизи месторождения в снеге содержание взвешенного вещества доходило до 7.6 мг/л, на расстоянии первых десятков километров значение снижалось уже до 3.0 мг/л. Среднее содержание взвеси в снеге данного района (т. 17) — 5.1 мг/л (см. рис. 3).

В прибрежной части Ненецкого автономного округа содержание взвешенного вещества в снеге находилось в диапазоне 0.5–4.2 мг/л. В материковой части содержание взвеси было выше: 6.2–6.8 мг/л (тт. 28–30), доходя до 17.3 мг/л в т. 27 (см. рис. 3). Здесь сказывается влияние ветрового выдувания почвенных частиц с оголенных

территорий. Ветры на данной территории отличаются большой силой, а, следовательно, и большей транспортирующей способностью (Конищев, Любимов, 1968), что прослеживается и в зимний период.

Элементный состав взвешенного вещества характеризуется относительной однородностью в отношении большинства элементов (табл.). Наибольший разброс в содержаниях выявлен для отдельных элементов.

Высокие содержания Ni, Cu, Co, V, Pb, As, Bi в составе нерастворимого вещества снежного покрова приурочены к Мончегорскому ГОКу (см. табл.), что обусловлено в том числе рудной спецификацией предприятия (Орекунова et al., 2021). Доля тяжелых металлов во взвешенном веществе снежного покрова вблизи Мончегорска уменьшается в ряду Ni>Al>Cu>Co>Ti>V>Pb>As>Mn>Ba>Cr>Bi (здесь и далее в рядах приведены элементы с содержанием более 100 мг/кг). Такой ряд значительно отличается от состава земной коры (Rudnick, Gao, 2003): Al>Ti>Mn>Ba>Sr. Помимо никеля, висмута, меди, кобальта, мышьяка, свинца, ванадия, взвешенное вещество снега вблизи Мончегорска обогащено сурьмой (КО = 81) и молибденом (КО = 20) (рис. 4).

Повышенное содержание никеля (1699 мг/кг) и меди (149 мг/кг) во взвеси снежного покрова прослеживается даже на расстоянии порядка 50 км на северо-запад от Мончегорска (т. 5). В результате атмосферного переноса примесей высокое содержание Ni, V, Cu характерно и в целом для Мурманской области (см. таблицу). Но все же здесь геохимический ряд нерастворимого вещества снега ближе к общему составу земной коры: Al>Ti>Mn>Ni>V>Ba>Sr>Zn>Cu.

На западном побережье Кольского залива (т. 2.), где наблюдается повышенное содержание нерастворимого вещества в снеге, определено высокое содержание во взвеси ванадия (1847 мг/кг). Значение коэффициента обогащения для данного элемента составило 83. Ванадий высоко токсичный элемент (I класс опасности), что определяет опасность воздействия атмосферного воздуха с его повышенным содержанием на население. Одним из источников антропогенного ванадия совместно с никелем являются мазутные теплоэлектростанции, включая ТЭЦ, и котельные (Постевая, Слуковский, 2021). ТЭЦ и котельные Мурманска, перейдя на мазут в 1960-е годы, до сих пор работают на этом виде топлива. Содержание никеля во взвеси снежного покрова западного побережья Кольского залива также повышено (643 мг/кг), а значение коэффициента обогащения, равное 60, говорит об антропогенном источнике поступления данного элемента. Кроме того, ванадий содержится в углях различного возраста и стадии углефикации (Жаров, 1995). Терминал по перегрузке угля в порту

Мурманска может быть главным источником пыли, содержащей ванадий и другие токсичные соединения, например никель.

Свои особенности имеет и взвешенное вещество снежного покрова вблизи Апатит (т. 6–7). Здесь отмечается высокое содержание марганца (до 5800 мг/кг), алюминия (до 104377 мг/кг), титана (до 4000 мг/кг). Выше чем в остальных точках Кольского полуострова и содержание редкоземельных металлов (далее – РЗМ) (лантан, церий, празеодим, неодим, самарий, европий, гадолиний, тербий, диспрозий, иттрий, гольмий, эрбий, тулий, иттербий, лютеций). Основным источником поступления взвеси – работа АНОФ-3 и АНОФ-2 Кировского филиала АО “Апатит”. Месторождения апатит-нефелиновых руд Хибинской группы, разрабатываемые АО “Апатит” (ПАО “ФосАгро”), также служат сырьевой базой РЗМ России. При этом значительная часть РЗМ остается в продуктах отвального комплекса (Государственный..., 2022).

В районе Кеми порядок элементов в геохимическом ряду состава взвешенного вещества снега (см. таблицу) отличается от среднего состава земной коры преобладанием бария и стронция над марганцем: $Al > Ti > Ba > Sr > Mn$. На территории Архангельской области и Ненецкого автономного округа в геохимический ряд добавляется цинк. Ряд для взвешенного вещества снега Архангельской области: $Al > Ti > Mn > Ba > Sr > Zn$, Ненецкого автономного округа: $Al > Ti > Mn > Ba > Zn > Sr$.

На территории Ненецкого автономного округа на фоне пониженного среднего содержания ванадия (36 мг/кг), марганца (393 мг/кг), кобальта (8 мг/кг), никеля (30 мг/кг), меди (40 мг/кг), молибдена (1.7 мг/кг) и кадмия (0.8 мг/кг) в нерастворимом остатке снега незначительно выше содержание свинца (79 мг/кг) и мышьяка (19 мг/кг) (см. таблицу). В зоне влияния ветрового выдувания почвенных частиц с оголенных территорий (т. 27) содержание микроэлементов во взвеси было низким. Влияние антропогенной деятельности на территории НАО проявляется в увеличении содержания во взвеси ванадия (61 мг/кг), марганца (757 мг/кг) и цинка (291 мг/кг) вблизи Харьгинского месторождения (т. 30). Повышенное содержание Zn в районе нефтедобычи ранее отмечалось и другими авторами (Московченко и др., 2022).

Состав взвешенного вещества Архангельской области в среднем ничем не выделяется относительно других рассматриваемых регионов. Но все же можно отметить несколько локальных особенностей. Взвешенное вещество вблизи выхода скальных пород на восточном побережье Онежского залива (т. 11) характеризовалось повышенным содержанием алюминия (71176 мг/кг), марганца (1331 мг/кг), ванадия (137 мг/кг), лития (25.3 мг/кг), скандия (16.3 мг/кг). Содержание этих

же элементов относительно выше во взвеси снежного покрова в устье р. Мезень (т. 20), где источником поступления нерастворимого вещества служат горные породы, слагающих высокие берега реки. Наибольшее содержание сурьмы (40 мг/кг) в составе взвеси снега обнаружены в Архангельской области на территории о. Ягры (т. 15). Здесь же зафиксировано максимальное (без учета Мончегорска) содержание в нерастворимом веществе меди (188 мг/кг). Предположительным источником загрязнения здесь могут быть предприятия судоремонта и судостроительства г. Северодвинск. Повышенные содержания марганца (5694 мг/кг) на территории Архангельской области получены в пробах снежного покрова, отобранных вблизи Архангельской агломерации (т. 16), где также увеличено содержание титана (3796 г/кг), никеля (278 мкг/кг), ванадия (119 мг/кг) и кобальта (48 мг/кг). Основным источником поступления антропогенных примесей – ТЭЦ АО “Архангельского ЦБК”, расположенная в 10 км на северо-запад. Наиболее чистыми районами Архангельской области можно назвать территорию Сийского заказника (т. 18) и западное побережье Онежского залива – деревня Ворзогоры (т. 10), где определены наименьшие концентрации тяжелых металлов во взвеси.

В целом для всего региона можно отметить обогащение взвешенного вещества снега кадмием (средние для районов значения КО, без учета Мончегорска, составили 31–72 (см. рис. 4), висмутом (КО = 23–38) и сурьмой (КО = 24–38). Для Кольского полуострова отмечается влияние на состав взвешенного вещества снега антропогенного источника никеля (КО = 32) и ванадия (КО = 16). В то же время среднее значение коэффициента обогащения взвеси медью для Кольского полуострова равнялось 8. На территории Архангельской области и Ненецкого автономного округа отмечается некоторое влияние антропогенных источников свинца и мышьяка (КО = 10–16). При этом следует отметить, что значения КО для данных примесей выше в отдаленных фоновых районах (Сийский заказник – т. 18, Пинежский заповедник – т. 19, устье р. Печора – т. 26).

Расчет коэффициентов парной корреляции проводился в целом для всей территории и отдельно для регионов. По данным корреляционного анализа всего массива данных зависимость содержания элементов в нерастворимом веществе снега от высоты снежного покрова и уровня pH талого снега выявить не удалось. Значимая связь (более 0.7) была определена между содержанием во взвеси Li, Be, Al, Sc, Ti, Y, Nb, Ba, Th и редкоземельных металлов. Во вторую группу элементов, между которыми проявилась сильная корреляционная связь, вошли Co, Ni, Cu, As, Pb, Bi.

Таблица. Состав взвешенного вещества снежного покрова, мг/кг

Элемент	Мурманская область без Мончегорска (тт. 1–3, 5–8)	Мончегорск (т. 4)	Кемь (т. 9)	Архангельская область (тт. 10–21)	Ненецкий автономный округ (тт. 22–30)
Li	$\frac{7.5-52.7^*}{23.6 \pm 15.9}$	24.0	28.4	$\frac{7.2-36.0}{17.7 \pm 9.3}$	$\frac{5.9-24.3}{15.3 \pm 7.6}$
Be	$\frac{0.06-4.7}{1.7 \pm 0.6}$	1.1	3.2	$\frac{0.3-3.7}{1.1 \pm 0.9}$	$\frac{0.3-1.6}{1.0 \pm 0.6}$
Al	$\frac{18731-104377}{46682 \pm 29658}$	50373	59199	$\frac{10975-79159}{35537 \pm 22135}$	$\frac{12546-39201}{28294 \pm 11654}$
Sc	$\frac{3.0-20.0}{8.3 \pm 6.0}$	9.1	14.0	$\frac{1.7-16.3}{6.1 \pm 4.2}$	$\frac{2.1-7.6}{5.0 \pm 2.3}$
Ti	$\frac{680-4000}{2080 \pm 1134}$	3089	4842	$\frac{833-3796}{1870 \pm 833}$	$\frac{1363-2539}{1816 \pm 505}$
V	$\frac{70.5-1847}{501 \pm 650}$	1307	50.1	$\frac{<п/о-137}{56.0 \pm 47.1}$	$\frac{9.4-61.6}{35.5 \pm 18.8}$
Mn	$\frac{147-5800}{1301 \pm 2019}$	430	320	$\frac{132-5694}{644 \pm 817}$	$\frac{237-757}{393 \pm 202}$
Co	$\frac{19.7-62.7}{34.6 \pm 15.8}$	3380	23.4	$\frac{4.3-47.8}{13.5 \pm 11.9}$	$\frac{3.1-13.8}{8.2 \pm 4.4}$
Ni	$\frac{138-1699}{604 \pm 537}$	100703	73.7	$\frac{15.6-278}{84.0 \pm 73.1}$	$\frac{6.7-41.4}{30.7 \pm 16.2}$
Cu	$\frac{56.2-149}{101 \pm 34.7}$	7477	71.3	$\frac{26.3-188}{69.3 \pm 42.6}$	$\frac{29.1-53.8}{40.3 \pm 10.5}$
Zn	$\frac{39.9-305}{128 \pm 91.5}$	50.3	75.7	$\frac{<п/о-551}{151 \pm 170}$	$\frac{98.1-243}{171 \pm 67}$
Ge	$\frac{1.1-3.3}{2.1 \pm 1.0}$	2.1	2.1	$\frac{0.8-2.6}{1.4 \pm 0.6}$	$\frac{1.2-1.9}{1.5 \pm 0.3}$
As	$\frac{<п/о-31}{9.9 \pm 13}$	480	38.7	$\frac{2.7-25.9}{14.9 \pm 7.9}$	$\frac{11.5-25.5}{18.7 \pm 5.7}$
Rb	$\frac{14.5-60.9}{38.8 \pm 19.1}$	41.2	32.3	$\frac{13.7-55.1}{30.0 \pm 13.0}$	$\frac{13.2-45.0}{32.2 \pm 15.4}$
Sr	$\frac{60.5-1655}{391 \pm 563}$	220	329	$\frac{27.1-451}{160 \pm 141}$	$\frac{59.5-324}{156 \pm 115}$
Nd	$\frac{4.5-29.0}{11.1 \pm 8.3}$	9.4	20.5	$\frac{2.2-14.2}{5.4 \pm 3.2}$	$\frac{4.5-5.5}{5.1 \pm 0.5}$
Mo	$\frac{1.9-9.6}{4.9 \pm 3.0}$	13.7	8.8	$\frac{0.8-18.6}{4.7 \pm 5.5}$	$\frac{0.6-2.7}{1.7 \pm 0.9}$
Cd	$\frac{0.3-2.9}{1.2 \pm 1.1}$	0.5	5.8	$\frac{0.4-3.5}{1.6 \pm 0.9}$	$\frac{0.5-1.1}{0.8 \pm 0.2}$

Таблица. Окончание

Элемент	Мурманская область без Мончегорска (тт. 1–3, 5–8)	Мончегорск (т. 4)	Кемь (т. 9)	Архангельская область (тт. 10–21)	Ненецкий автономный округ (тт. 22–30)
Sb	$\frac{2.8-12.3}{5.9 \pm 3.3}$	20.0	7.6	$\frac{0.4-39.6}{6.7 \pm 10}$	$\frac{0.5-6.8}{2.8 \pm 1.6}$
Cs	$\frac{0.7-4.4}{2.4 \pm 1.5}$	2.0	3.8	$\frac{0.8-3.1}{1.8 \pm 0.6}$	$\frac{0.4-5.5}{1.9 \pm 0.7}$
Ba	$\frac{119-947}{408 \pm 292}$	399	951	$\frac{142-839}{313 \pm 210}$	$\frac{56.0-513}{246 \pm 105}$
Pb	$\frac{26.6-139}{59.8 \pm 38.4}$	591	83.4	$\frac{16.2-102}{61.0 \pm 28.2}$	$\frac{36.6-135}{79.5 \pm 46.6}$
Bi	$\frac{0.7-3.9}{1.8 \pm 1.0}$	116	3.4	$\frac{0.2-3.8}{2.3 \pm 1.2}$	$\frac{0.1-4.0}{1.7 \pm 0.6}$
Th	$\frac{2.0-15.8}{6.6 \pm 5.1}$	6.2	10.4	$\frac{1.4-12.2}{4.3 \pm 2.9}$	$\frac{1.7-4.8}{3.6 \pm 1.4}$
U	$\frac{0.8-12.0}{3.4 \pm 3.9}$	1.5	4.0	$\frac{0.4-8.7}{2.3 \pm 2.5}$	$\frac{1.1-4.3}{3.0 \pm 1.5}$

*В числителе: минимум–максимум, в знаменателе: среднее значение $\pm$ СКО.

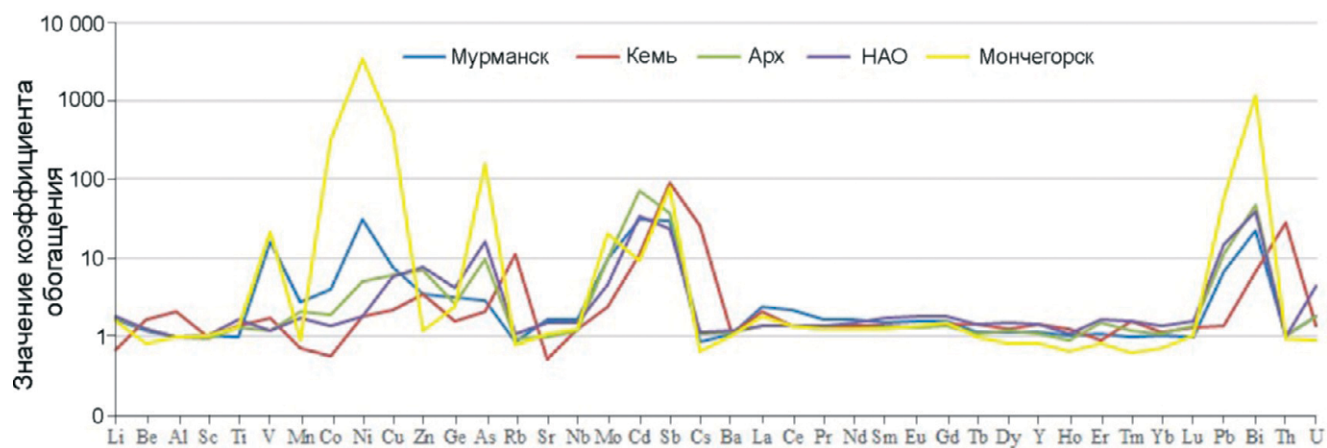


Рис.4. Значения коэффициентов обогащения взвешенного вещества. Номера точек совпадают с нумерацией на рис. 1

Fig. 4: Values of suspended solids enrichment factors. Point numbers are the same as in Fig. 1

На территории Кольского полуострова ко второй группе добавляется сурьма. Кроме того, на данной территории прослеживается сильная связь между содержанием во взвеси цинка и марганца ($KK = 0.91$). При этом при снижении уровня pH талых вод отмечается снижение содержания во взвеси цинка ($KK = 0.78$). Коррелирует между собой содержание молибдена, мышьяка, свинца и таллия ($KK = 0.73-0.85$).

В составе взвешенного вещества снега рассматриваемой части Архангельской области корреляционная связь определена только для первой группы, куда вошли и кобальт и марганец. Выявлена также связь содержания меди с содержанием сурьмы и стронция, а также цинка с марганцем.

В составе нерастворимого вещества снежного покрова Ненецкого автономного округа содержание титана коррелирует с содержанием РЗМ, но не

зависит от содержания лития, бериллия, алюминия и скандия. В то же время определена тесная связь титана с содержанием во взвеси никеля, кадмия и сурьмы. С элементами первой группы определена связь содержания во взвеси ванадия. Получены высокие значения коэффициента корреляции между содержанием меди и молибдена, а также цинка и марганца с кобальтом. Содержание мышьяка имеет связь с содержанием германия и висмута.

ВЫВОДЫ

По результатам проведенного исследования в период максимального снегонакопления в зимний период 2022/23 г. более низкие значения pH талого снега определены на Кольском полуострове. Высокие значения pH характерны для территории Ненецкого автономного округа как вследствие природных факторов (устьевые области рек), так и антропогенных (вблизи Харьгинского месторождения).

В среднем содержание взвешенного вещества в снежном покрове западного сектора Российской Арктики находилось на уровне 3.4 мг/л. Увеличение содержания взвеси в снеге происходит локально под влиянием антропогенных факторов (западное побережье Кольского залива, район месторождения алмазов им. М.В. Ломоносова) и природных особенностей (выход скальных пород на восточной части побережье Онежского залива, устье р. Мезень, зоны выдувания в Большеземельской тундре).

Нерастворимое вещество снега вблизи Мончегорска обогащено Ni, Bi, Cu, Co, V, Pb, As, Sb и Mo. Разработка апатит-нефелиновых руд приводит к увеличению во взвеси содержания марганца, алюминия, титана и РЗМ вблизи г. Апатиты. Значимым источником загрязнения снежного покрова нерастворимыми формами ванадия и никеля на западном побережье Кольского залива является деятельность по перегрузке угля в порту Мурманска.

На севере Архангельской области предприятия судостроительства и судоремонта г. Северодвинск служат источником сурьмы и меди в нерастворимом веществе снега. Вследствие влияния ТЭЦ Архангельской агломерации в устьевой области р. Северная Двина определено повышенное содержание во взвеси марганца, титана, никеля, ванадия, кобальта. В фоновых районах отмечается обогащение взвешенного вещества свинцом и мышьяком.

Благодарности. Исследование выполнено за счет средств гранта Российского научного фонда “Атмосферный перенос как источник загрязнения экосистем западного сектора Российской Арктики” № 22-77-10074. Авторы благодарят туристическую компанию “Еду в НАО” за помощь в проведении экспедиционных работ.

Acknowledgements. The Russian Science Foundation supported the research within the framework of project No. 22-77-10074 “Atmospheric transport as a source of pollution of ecosystems in the western sector of the Russian Arctic”. The authors are grateful to the travel company “Edu v NAO” for their assistance in carrying out fieldworks.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Голубева Н.И., Бурцева Л.В., Гинзбург В.А. Тяжелые металлы в атмосферных осадках на побережье Баренцева моря // Метеорология и гидрология. 2010. № 5. С. 60–70.
- Государственный доклад о состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2021 году // Электронный ресурс. https://gd2021.data-geo.ru/nfm/tr/#tbl_2 Дата обращения 24.07.2024.
- Жаров Ю.Н. Изучение и оценка токсичных микроэлементов в товарных энергетических углях России // Горный информационно-аналитический бюллетень. 1995. № 5. С. 54–56.
- Конищев В.Н., Любимов Б.П. Древние эоловые формы рельефа в Большеземельской тундре // Вестник Московского ун-та. Серия География. 1968. № 2. С. 96–99.
- Котова Е.И., Нецветова О.П., Новикова Ю.В., Тумова К.В. Физико-химические характеристики и альгологический состав снежного покрова в устьях рек бассейна юго-восточной части Баренцева моря // Арктика: экология и экономика. 2024. Т. 14. № 1 (53). С. 127–134. <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2024-1-127-134>
- Котова Е.И., Шевченко В.П. Влияние дальнего атмосферного переноса на формирование ионного состава атмосферных осадков и снежного покрова прибрежной зоны западного сектора российской Арктики // Фундаментальные исследования. 2014. № 12–11. С. 2378–2382.
- Лисицын А.П. Аридная седиментация в Мировом океане. Рассеянное осадочное вещество атмосферы // Геология и геофизика. 2011. Т. 52. № 10. С. 1398–1439.
- Московченко Д.В., Пожитков Р.Ю., Тигеев А.А. Оценка содержания металлов и металлоидов в снежном покрове на участках нефтедобычи Среднего Приобья // Лёд и Снег. 2022. Т. 62. № 4. С. 551–563. <https://doi.org/10.31857/S2076673422040151>
- Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2023 год. М.: Росгидромет, 2024. 215 с.
- Опекунов А.Ю., Опекунова М.Г., Кукушкин С.Ю., Янсон С.Ю., Арестова И.Ю., Шейнерман Н.А., Спаский В.В., Папаян Э.Э., Елсукова Е.Ю. Минералогическая характеристика снежного покрова в районах горнорудного производства //

- Геохимия. 2021. Т. 66. № 7. С. 659–672.
<https://doi.org/10.31857/S0016752521060078>
- Постева М.А., Слукровский З.И. Анализ атмосферных выбросов в г. Мурманске и их связь с загрязнением городских озер // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2021. Т. 24. № 2. С. 190–201.
<https://doi.org/10.21443/1560-9278-2021-24-2-190-201>
- Система Белого моря. Т. II. Водная толща и взаимодействующие с ней атмосфера, криосфера, речной сток и биосфера / Отв. ред. А.П. Лисицын; ред. И.А. Немировская. М.: Научный мир, 2012. 784 с.
- Суркова Г.В., Еремина И.Д., Мордкович П.А. О влиянии крупномасштабного атмосферного переноса на химический состав и количество атмосферных осадков в центре европейской территории России // Метеорология и гидрология. 2010. № 4. С. 36–44.
- Шевченко В.П. Влияние аэрозолей на среду и морское осадконакопление в Арктике. М.: Наука, 2006. 226 с.
- 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. 551–575.
- Шевченко В.П., Лисицын А.П., Штайн Р., Горюнова Н.В., Клювиткин А.А., Кравчишина М.Д., Кривс М., Новигатский А.Н., Соколов В.Т., Филиппов А.С., Хаас Х. Распределение и состав нерастворимых частиц в снеге Арктики // Проблемы Арктики и Антарктики. 2007. № 1 (75). С. 106–118.
- Шурко В.О. Характеристики снежного покрова в районе разработки месторождения алмазов им. М.В. Ломоносова (по данным экспедиции 2023 г.) // Сб. материалов науч.-практич. конф. “Ломоносовские научные чтения студентов, аспирантов и молодых ученых высшей школы естественных наук и технологий САФУ”. Архангельск: Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова, 2024. С. 272–277.
- Duce R.A., Liss P.S., Merrill J.T. The atmospheric input of trace species to the World Ocean // Global Biogeochemical Cycles. 1991. V. 5. № 3. P. 193–259.
- Lee S., Lee K., Han Ch., Han Y., Hong S.-B., Hur S.D., Lee S., Chang Ch., Jung H., Moon J., Boutron C.F., Hong S. Recent decline in atmospheric Pb deposition and isotopic constraints on changes in source contributions in snow from northwestern Greenland // Chemosphere. 2023. V. 345. P. 140441.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.140441>
- Opekunova M., Opekunov A., Elsukova E., Kukushkin S., Janson S. Comparative analysis of methods for air pollution assessing in the Arctic mining area // Atmospheric Pollution Research. 2021. V. 12. P. 76–88.
- Pouch A., Zaborska A. Climate change influence on migration of contaminants in the arctic marine environment chapter in: impact of climate changes on marine environments // Geopl. Earth Planet. Sci. 2015. P. 75–90.
http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-14283-8_7
- Rudnick R.L., Gao S. Composition of the continental crust // Treatise on Geochemistry. 2003. V. 3. P. 1–64.
- Schiedek D., Sundelin B., Readman J.W., Macdonald R.W. Interactions between climate change and contaminants // Marine Pollution Bulletin. 2007. V. 54. P. 1845–1856.
- Souza-Kasprzyk J., Kozak L., Niedzielski P. Impacts of anthropogenic activities and glacial processes on the distribution of chemical elements in Billefjord, Svalbard, Arctic // Science of The Total Environment. 2024. V. 909. P. 168534.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168534>
- Stanek L.W., Sacks J.D., Dutton S.J., Dubois J.J.B. Attributing health effects to apportioned components and sources of particulate matter: an evaluation of collective results // Atmospheric Environment. 2011. V. 45. P. 5655–5663.

Citation: Kotova E. I., Starodymova D. P., Lokhov A. S., Netsvetaeva O. P. Distribution and composition of suspended solids in the snow cover of the western sector of the Russian Arctic. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2024, 64 (4): 591–601. [In Russian]. doi: 10.31857/S2076673424040097

Distribution and composition of suspended solids in the snow cover of the western sector of the Russian Arctic

E. I. Kotova[#], D. P. Starodymova, A. S. Lokhov, O. P. Netsvetaeva

Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow, Russia

[#]*e-mail: ecopp@yandex.ru*

Received August 8, 2024 / Revised September 11, 2024 / Accepted October 7, 2024

The results of a study of the content and composition of suspended solid matter in snow samples taken in the western mainland of the Russian Arctic (Kola Peninsula, North of Arkhangelsk Oblast, Nenets Autonomous Okrug) are presented. The concentrations of insoluble forms of 40 elements were determined by ICP-MS method in samples collected at the end of the 2022/23 winter season. The sampled snow had pH values ranging from 5.0 to 9.2. Lower pH values were found in melted snow of the Kola Peninsula. High pH values are typical for snow from the territory of the Nenets Autonomous Okrug. The average content of insoluble matter in snow over the whole investigated area was equal to 3.4 mg/l. The increase in the content of suspended matter occurs locally due to anthropogenic factors and natural features. The insoluble matter in snow near Monchegorsk is enriched with Ni, Bi, Cu, Co, V, Pb, As, Sb and Mo. The production of the apatite-nepheline ores accounts for an increase of manganese, aluminum, titanium and SPM in the samples near the town of Apatity. A significant source of pollution of the snow cover with insoluble forms of vanadium and nickel found on the western coast of the Kola Bay is the coal transshipment activities in the port of Murmansk. In the north of the Arkhangelsk region, the shipbuilding and ship repair enterprises in the city of Severodvinsk serve as a source of antimony and copper in the insoluble substance of snow. Increasing content of manganese, titanium, nickel, vanadium, and cobalt has been determined in the suspension in the area of the Northern Dvina River mouth that is caused by influence of the thermal power plant of the Arkhangelsk agglomeration. In background areas, the suspended matter is enriched with lead and arsenic. The data obtained will make possible to estimate the load on Arctic ecosystems, which are vulnerable even under a small anthropogenic impact, and provide information for understanding the processes occurring in nature and further rational management of Arctic ecosystems.

Keywords: snow cover, suspended matter, metals, Arctic

REFERENCES

- Golubeva N.I., Burtseva L.V., Ginzburg V.A. Heavy metals in atmospheric precipitation on the coast of the Barents Sea. *Meteorologija i gidrologija* Meteorology and Hydrology. 2010, 5: 60–70. [In Russian].
- Gosudarstvennyj doklad o sostojanii i ispol'zovanii mineral'no-syr'evyh resursov Rossijskoj Federacii v 2021 godu. State report on the state and use of mineral resources of the Russian Federation in 2021. Retrieved from: https://gd2021.data-geo.ru/nfm/tr/#tbl_2 Last access: 24.07.2024. [In Russian].
- Zharov Yu.N. Study and evaluation of toxic trace elements in commodity energy coals of Russia. *Gornyj informacionno-analiticheskij bjulleten'*. Mining information-analytical bulletin. 1995, 5: 54–56. [In Russian].
- Konischev V.N., Lyubimov B.P. Ancient aeolian landforms in the Bolshezemelskaya tundra. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Ser. Geografija*. Bulletin of Moscow University. Ser. Geography. 1968, 2: 96–99. [In Russian].
- Kotova E.I., Netsvetayeva O.P., Novikova Yu.V., Titova K.V. Physico-chemical characteristics and algological composition of snow cover in the estuaries of the rivers of the basin of the southeastern part of the Barents Sea. *Arktika: ekologija i ekonomika*. Arctic: Ecology and Economics. 2024, 1 (53): 127–134. <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2024-1-127-134> [In Russian].
- Kotova E.I., Shevchenko V.P. Influence of long-range atmospheric transport on the formation of ionic composition of precipitation and snow cover of the coastal zone of the western sector of the Russian Arctic. *Fundamental'nye issledovanija*. Fundamental Research. 2014, 12–11: 2378–2382. [In Russian].
- Lisitsyn A.P. Arid sedimentation in the World Ocean. Atmospheric dispersed sedimentary matter. *Geologija i geofizika*. Geology and Geophysics. 2011, 52 (10): 1398–1439. [In Russian].
- Moskovchenko D.V., Pozhitkov R.Yu., Tigeev A.A. Assessment of metal and metalloid content in the snow cover at the oil production sites of the Middle Priobie. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2022, 4 (62): 551–563.

- <https://doi.org/10.31857/S2076673422040151> [In Russian].
- Obzor sostojanija i zagriznenija okruzhajushhej sredy v Rossijskoj Federacii za 2023 god.* Review of the state and pollution of the environment in the Russian Federation for 2023. Moscow: Roshydromet, 2024: 215 p. [In Russian].
- Opekunov A.Yu., Opekunova M.G., Kukushkin S.Yu., Yanson S.Yu., Arestova I.Yu., Sheinerman N.A., Spassky V.V., Papyan E.E., Elsukova E.Yu.* Mineralogical and geochemical characterization of snow cover in areas of mining production. *Geokhimija. Geochemistry.* 2021, 66 (7): 659–672.
<https://doi.org/10.31857/S0016752521060078> [In Russian].
- Postevaya M.A., Slukovsky Z.I.* Analysis of atmospheric emissions in Murmansk and their relationship with the pollution of urban lakes. *Vestnik MGTU. The journal "Bulletin of the Moscow State Technical University"*. 2021, 24 (2): 190–201.
<https://doi.org/10.21443/1560-9278-2021-24-2-190-201> [In Russian].
- Sistema Belogo morja.* The White Sea System. V. 2. Water column and the atmosphere, cryosphere, river runoff and biosphere interacting with it. Moscow: Nauchny Mir, 2012: 784 p. [In Russian].
- Surkova G.V., Eremina I.D., Mordkovich P.A.* On the influence of large-scale atmospheric transport on the chemical composition and amount of precipitation in the center of the European territory of Russia. *Meteorologija i gidrologija. Meteorology and Hydrology.* 2010, 4: 36–44. [In Russian].
- Shevchenko V.P.* Vlijanie ajerozolej na sredu i morskoe osadkonakoplenie v Arktike. Aerosols influence on the environment and marine sedimentation in the Arctic. Moscow: Nauka, 2006: 226 p. [In Russian].
- Shevchenko V.P., Lisitsyn A.P., Vinogradova A.A., Smirnov V.V., Serova V.V., Stein R.* Aerosols of the Arctic - results of ten-year studies. *Optika atmosfery i okeana. Atmospheric and Ocean Optics* 2000, 13 (6/7): 551–575. [In Russian].
- Shevchenko V.P., Lisitsyn A.P., Stein R., Goryunova N.V., Klyuvitkin A.A., Kravchishina M.D., Krivs M., Novigatsky A.N., Sokolov V.T., Filippov A.S., Haas H.* Distribution and composition of insoluble particles in Arctic snow. *Problemy Arktiki i Antarktiki. Problems of Arctic and Antarctic.* 2007, 1 (75): 106–118. [In Russian].
- Shurko V.O.* Characteristics of the snow cover in the area of the Lomonosov diamond deposit development (according to the expedition data of 2023). *Sbornik materialov nauchno-prakticheskoy konferencii "Lomonosovskie nauchnye chtenija studentov, aspirantov i molodyh uchenyh vysshej shkoly estestvennyh nauk i tehnologij SAFU"*. Collection of materials of the scientific-practical conference "Lomonosov Scientific Readings of students, graduate students and young scientists of the SAFU Higher School of Natural Sciences and Technologies". Arkhangelsk: Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, 2024: P. 272–277. [In Russian].
- Duce R.A., Liss P.S., Merrill J.T.* The atmospheric input of trace species to the World Ocean. *Global Biogeochemical Cycles.* 1991. V. 5 (3): 193–259.
- Lee S., Lee K., Han Ch., Han Y., Hong S.-B., Hur S.D., Lee S., Chang Ch., Jung H., Moon J., Boutron C.F., Hong S.* Recent decline in atmospheric Pb deposition and isotopic constraints on changes in source contributions in snow from northwestern Greenland. *Chemosphere.* 2023, 345: 140441.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.140441>
- Opekunova M., Opekunov A., Elsukova E., Kukushkin S., Janson S.* Comparative analysis of methods for air pollution assessing in the Arctic mining area // *Atmospheric Pollution Research.* 2021, 12: 76–88.
- Pouch A., Zaborska A.* Climate change influence on migration of contaminants in the arctic marine environment chapter in: impact of climate changes on marine environments. *Geopl. Earth Planet. Sci.* 2015: 75–90.
http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-14283-8_7
- Rudnick R.L., Gao S.* Composition of the continental crust. *Treatise on Geochemistry.* 2003, 3: 1–64.
- Schiedek D., Sundelin B., Readman J.W., Macdonald R.W.* Interactions between climate change and contaminants. *Marine Pollution Bulletin.* 2007, 54: 1845–1856.
- Souza-Kasprzyk J., Kozak L., Niedzielski P.* Impacts of anthropogenic activities and glacial processes on the distribution of chemical elements in Billefjord, Svalbard, Arctic. *Science of The Total Environment.* 2024, 909: 168534.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168534>
- Stanek L.W., Sacks J.D., Dutton S.J., Dubois J.J.B.* Attributing health effects to apportioned components and sources of particulate matter: an evaluation of collective results. *Atmospheric Environment.* 2011, 45: 5655–5663.