

<https://doi.org/10.47612/2079-3928-2026-1-160-171>
УДК 550.4+504.5(476)

Поступила в редакцию 21.05.2026
Received 21.05.2026

ГИДРОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ АТМОСФЕРНЫХ ОСАДКОВ И СНЕЖНОГО ПОКРОВА В г. МИНСКЕ

Ю. Г. Кокош, М. А. Кудревич

Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Аннотация. На основе результатов мониторинга химического состава атмосферных осадков и снежного покрова на экспериментальной площадке Института природопользования НАН Беларуси охарактеризованы особенности их состава в г. Минске по результатам наблюдений в 2023 г.

Среднегодовые концентрации в атмосферных осадках составили: серы – 0,42 мг S/л, окисленного азота – 0,31 мг N/л, восстановленного азота – 0,45 мг N/л. В снежном покрове за зимний период 2022–2023 гг. соответствующие значения достигли 0,31 мг S/л; 0,35 и 0,22 мг N/л. Атмосферные осадки характеризовались преимущественно нейтральной реакцией среды (среднее значение pH 6,12) и пониженной минерализацией по сравнению с предыдущими годами.

Выявлена синхронность внутригодовой динамики соединений серы и азота, обусловленная общностью источников их поступления. Показано влияние метеорологических условий на вариабельность концентраций, а также значительная роль локальных антропогенных факторов в формировании химического состава снежного покрова.

Сопоставление с данными станций Программы ЕМЕП показало, что уровни содержания основных компонентов соответствуют диапазону значений для стран-соседей. Подтверждён долгосрочный тренд снижения содержания соединений серы и азота при сохранении межгодовой изменчивости.

Ключевые слова: атмосферные осадки; атмосферные выпадения; азот; сера; закисление; эвтрофирование.

Для цитирования. Кокош Ю. Г., Кудревич М. А. Гидрохимические особенности атмосферных осадков и снежного покрова в г. Минске // Природопользование. – 2026. – № 1. – С. 160–171.

HYDROCHEMICAL PECULIARITIES OF ATMOSPHERIC PRECIPITATES AND SNOW COVER IN MINSK

Yu. G. Kokosh, M. A. Kudrevich

Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

Abstract. The study presents the results of monitoring the chemical composition of atmospheric precipitation and snow cover at the experimental site of the Institute for Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus in Minsk in 2023.

The volume-weighted mean concentrations in precipitation were 0.42 mg S/L for sulfur, 0.31 mg N/L for oxidized nitrogen, and 0.45 mg N/L for reduced nitrogen. In the snow cover during the winter period of 2022–2023, the corresponding values were 0.31, 0.35, and 0.22 mg/L. Atmospheric precipitation was characterized by predominantly neutral conditions (mean pH of 6.12) and reduced mineralization compared to previous years.

A synchronous intra-annual variation of sulfur and nitrogen compounds was identified, indicating common emission sources. The influence of meteorological conditions on concentration variability was demonstrated, along with the significant role of local anthropogenic factors in shaping the chemical composition of snow cover.

Comparison with data from EMEP monitoring stations showed that the concentrations of major components fall within the range observed in neighboring countries. A long-term decreasing trend in sulfur and nitrogen content was confirmed, despite interannual variability.

Keywords: precipitation; atmospheric deposition; nitrogen; sulfur; acidification; eutrophication.

For citation. Kokosh Yu. G., Kudrevich M. A. Hydrochemical peculiarities of atmospheric precipitates and snow cover in Minsk // *Nature Management*, 2026. no. 1, pp. 160–171.

Введение. Атмосферные осадки и снежный покров являются важнейшими компонентами окружающей среды, отражающими состояние атмосферного воздуха и уровень антропогенного воздействия на урбанизированные территории. Химический состав осадков формируется под влиянием природных факторов и техногенных источников загрязнения, включая выбросы промышленности, энергетики, транспорта, а также трансграничный перенос загрязняющих веществ. Исследование химического состава атмосферных осадков и снежного покрова позволяет получать информацию о поступлении химических элементов и соединений из атмосферы, оценивать масштабы загрязнения и выявлять особенности миграции загрязняющих веществ в городской среде.

Особую актуальность такие исследования приобретают для крупных городов, где высокая плотность населения, интенсивное развитие промышленности и транспортной инфраструктуры способствуют формированию сложной экологической обстановки. Город Минск как крупнейший промышленный, административный и транспортный центр Республики Беларусь подвержен значительной антропогенной нагрузке, что может оказывать влияние на химический состав атмосферных выпадений. Атмосферные осадки и снежный покров в условиях города служат индикаторами аэротехногенного загрязнения, а их анализ позволяет оценивать уровень накопления макрокомпонентов.

В отличие от жидких осадков, снег способен накапливать аэрозоли, пыль, продукты сгорания топлива и другие примеси, обеспечивая интегральную характеристику атмосферного загрязнения за продолжительный промежуток времени. Анализ его химического состава позволяет выявлять пространственные различия загрязнения, устанавливать основные источники поступления загрязняющих веществ и оценивать потенциальные экологические риски для почв, поверхностных и грунтовых вод в период снеготаяния.

Несмотря на значительное количество исследований в области химии атмосферных осадков, для г. Минска сохраняется необходимость комплексной оценки современного состояния атмосферных выпадений с учётом изменений структуры выбросов, климатических факторов и роста урбанизационной нагрузки. Особую проблему представляет закисление осадков, способных оказывать негативное воздействие на городские экосистемы и здоровье населения.

Таким образом, изучение химического состава атмосферных осадков и снежного покрова позволяет оценивать уровень атмосферного загрязнения, выявлять тенденции его изменения, совершенствовать экологический мониторинг и разрабатывать меры по снижению антропогенного воздействия на окружающую среду.

Интенсивные исследования атмосферных осадков проводятся во всем мире в течение последних 30 лет в рамках многих национальных и международных программ, в частности, Совместной программы наблюдений и оценки переноса на большие расстояния загрязняющих веществ в Европе (Программы ЕМЕП [1–6]). В то же время основная часть наблюдений за осадками проводится на фоновых территориях, в связи с чем вопросы изменений химического состава осадков в городах остаются недостаточно изученными.

С 1999 г. Институтом природопользования НАН Беларуси организована площадка наблюдения за химическим составом атмосферных осадков и снежного покрова в г. Минске. Постоянные исследования на ней начали проводить, начиная с 2002 г. В ранее опубликованных работах [7–9] обобщены полученные данные и проанализированы тренды химического состава атмосферных осадков за период с 2002 по 2019 г. и за 2018–2022 гг. Данная статья посвящена анализу особенностей химического состава атмосферных осадков и снежного покрова на территории г. Минска в 2023 г. по сравнению с предыдущими периодами. Выбор 2023 г. обусловлен несколькими причинами. Это последний завершённый год наблюдений, для которого сформирован полный массив данных по атмосферным осадкам и снежному покрову без пропусков; характеризовался наличием достаточно длительного устойчивого периода залегания снежного покрова по сравнению с последующим зимними периодами 2024 и 2025 г.

Цели работы – изучить внутригодовую динамику компонентов химического состава атмосферных осадков и снежного покрова во взаимосвязи с метеоусловиями; оценить интенсивность атмосферных выпадений.

Материалы и методы исследований. Для изучения различных аспектов химического состава атмосферных осадков и снежного покрова на урбанизированных территориях Институтом природопользования НАН Беларуси на его территории в северо-восточной части г. Минска организована экспериментальная площадка. Первые наблюдения на данной сети выполнены в 1996 г. [7], регулярные наблюдения за атмосферными осадками на экспериментальной площадке начали проводить, начиная с 2002 г., за снежным покровом – с 2004 г. [8]. При формировании программы наблюдений учитывали рекомендации Глобальной службы атмосферы (ГСА) [10] и Программы ЕМЕП [11].

На площадке проводили наблюдения за количеством выпадающих осадков, изучали динамику мощности снежного покрова, контролировали химический состав атмосферных осадков и снеговых вод, метеоусловия. Основным период, за который отбирали пробы осадков, в соответствии с рекомендациями Программы ЕМЕП – неделя. Данный срок позволяет получить существенно более полную информацию о химическом составе осадков, чем при традиционном отборе месячных проб.

Опробование атмосферных осадков проводили при помощи осадкомера конструкции NILU. Для исключения значительного влияния испарения в период накопления пробы в тёплое время года использовали летний вариант осадкосборника.

Отбор проб снежного покрова осуществляли согласно методическим указаниям с помощью стандартного металлического весового снегомера ВС-43, заглубляемого на всю толщину снежного покрова до поверхности земли. После этого трубу из снега извлекали, поддерживая снизу лопаткой. Нижнюю часть снегомера тщательно очищали от частиц грунта. Отбирали сводные пробы весом 1,5–2,5 кг из 2–7 кернов в зависимости от высоты снежного покрова.

Образцы снега растапливали при комнатной температуре, талую воду фильтровали через фильтр «синяя лента». По осадку, полученному на фильтре, определяли количество взвешенных частиц в отобранной пробе, а в фильтрате определяли следующие показатели: SO_4^{2-} , NO_3^- , NH_4^+ , HCO_3^- , Cl^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , pH.

Содержание хлоридов определяли с помощью титриметрического метода с нитратом серебра (СТБ 17.13.05-39-2015), гидрокарбонат-ионов – титриметрически с использованием тетраборнокислого натрия (ГОСТ 31957-2012), сульфатов – турбидиметрически (СТБ 17.13.05-42-2015), натрия и калия – методом пламенной фотометрии (МВИ.МН 2140-2004), кальция и магния – титриметрически (СТБ 17.13.05-46-2016) и методом атомно-абсорбционной спектроскопии, величину pH – потенциометрическим методом (СТБ ISO 10523-2009), удельную электропроводность – с использованием кондуктометра. Контроль качества выполняемых измерений проводили в соответствии с принятой в лаборатории процедурой внутреннего контроля качества и рекомендаций программ ГСА и ЕМЕП (на основе вычисления ионного баланса) [10, 11], а также путём участия в лабораторных сличительных испытаниях, проводимых Центром обеспечения качества и научной деятельности ГСА.

Экспериментальные результаты сопоставлены с результатами измерений на станциях Программы ЕМЕП в Европе.

В 2023 г. на экспериментальной площадке во дворе Института природопользования НАН Беларуси отобрано 44 пробы атмосферных осадков. Средний объем пробы составил 505 мл с диапазоном 10–2250 мл. В пробах атмосферных осадков объёмом менее 50 мл определены только значения кислотности и удельной электропроводности. Помимо атмосферных осадков во дворе Института природопользования НАН Беларуси отобраны 9 проб снежного покрова.

Данные результатов химического анализа проб атмосферных осадков и снежного покрова, а также наблюдений за метеоусловиями и состоянием снежного покрова сформированы в базу данных, которая создана в программах MS Access 2007 и MS Excel 2007.

На основании результатов химико-аналитических испытаний рассчитаны основные статистические параметры, а также среднемесячные и среднегодовые взвешенные концентрации и выпадения за исследуемый период.

Результаты и их обсуждение. Химический состав атмосферных осадков в 2023 г. В 2023 г. на экспериментальной площадке Института природопользования НАН Беларуси выпало 707,6 мм осадков. Как и в предыдущие годы, наибольшее количество осадков выпало в летний период и составило 36 % суммы годовых осадков, наименьшее – в весенний (18 %).

В разрезе месячных значений суммы осадков на экспериментальной площадке колебались от 5,4 до 161,2 мм со средним значением 59,0 мм. Наибольшее количество осадков выпало в январе (69,0 мм), марте (98,4), июле (161,2) и октябре – ноябре (70,5 и 76,1 мм соответственно); в эти месяцы их значения в 1,3–2,4 раза превышали климатическую норму. Наименьшие месячные суммы осадков зафиксированы в апреле – мае (22,6 и 5,4 мм соответственно) и сентябре (32,8 мм). Месячные данные по осадкам на станции Минск хорошо соотносятся с данными на экспериментальной площадке. Наибольшее расхождение получено в августе.

В зависимости от объёма пробы, необходимого для химико-аналитического определения гидрохимического состава, проанализированы 42 пробы. Статистические характеристики содержания основных ионов, кислотности, электропроводности атмосферных осадков на постоянной площадке в 2023 г. приведены в табл. 1.

Таблица 1. Статистические параметры гидрохимического состава атмосферных осадков на постоянной экспериментальной площадке в г. Минске, 2023 г., мг/л**Table 1. Statistical parameters of the hydrochemical composition of atmospheric precipitation at a permanent experimental site in Minsk, 2023, mg/l**

Параметр	$\text{SO}_4^{2-}(\text{S})$	Cl^-	$\text{NO}_3^-(\text{N})$	HCO_3^-	$\text{NH}_4^+(\text{N})$	Na^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	pH	Электропроводность, мкСм/см
Среднее	0,42	1,93	0,31	3,33	0,45	0,87	0,83	0,74	0,44	6,12	26,10
Медиана	0,45	1,79	0,28	3,37	0,42	0,65	0,60	0,61	0,28	6,16	22,20
Стандартное отклонение	0,21	1,11	0,16	2,55	0,25	0,75	0,79	0,50	0,47	0,33	13,3
Дисперсия выборки	0,05	1,22	0,03	6,50	0,06	0,56	0,62	0,25	0,22	0,11	177,9
Минимум	н. о.*	0,20	0,03	0,34	0,09	0,05	0,10	0,08	0,12	5,08	9,9
Максимум	0,85	4,42	0,70	12,28	1,01	2,96	3,85	1,94	2,50	6,89	77,3
Количество проб	39	30	39	27	39	30	30	28	28	42	40
Коэффициент вариации, %	50,7	57,3	53,1	76,5	57,1	86,1	94,6	67,3	107,6	5,3	51,1

* н. о. – ниже предела обнаружения метода.

Средняя минерализация атмосферных осадков в 2023 г. составила 9,2 мг/л, что ниже показателей предыдущих трёх лет (31,0; 18,3; и 12,3 мг/дм³). В то же время суммарное количество осадков в 2020–2023 гг. сохранялось на относительно стабильном уровне (580–708 мм), что свидетельствует о снижении суммарной аэрозольной нагрузки на атмосферу. Это может быть связано как с уменьшением выбросов загрязняющих веществ, так и с изменениями метеорологических условий, способствующих более эффективному вымыванию загрязнителей.

Отмечено существенное колебание показателя минерализации недельных проб – от 2,4 до 26,5 мг/л. Минимальные значения минерализации недельных проб (2,4 и 2,6 мг/дм³) обнаружены в пробах за период с 23 по 30 января и с 28 августа по 4 сентября 2023 г., максимальное – (26,5 мг/дм³) в пробе за период с 6 по 13 ноября 2023 г. Разброс значений составил 55 %. По данным Национальной системы мониторинга окружающей среды (НСМОС) в 2023 г. минерализация атмосферных осадков в городах Беларуси изменялась от 7,6 мг/л в Мозыре до 27,6 мг/л в Березино; в Минске данный показатель составил 12,0 мг/л [12, 13].

Значения удельной электропроводности в 2023 г. варьировали в пределах 9,9–77,3 мкСм/см (см. табл. 1). Среднее значение показателя – 26,1 мкСм/см, что в 1,3 раза ниже показателя прошлого года (33,0 мкСм/см). Вариабельность значений невысокая – 51%. На станции Высокое среднее значение удельной электропроводности в 2023 г. составило 34,2 мкСм/см и варьировало от 12,0 до 52,0 мкСм/см [12, 13]. Минимальные показатели электропроводности на экспериментальной площадке характерны для проб за периоды с 17 по 24 июля, с 24 по 31 июля и с 7 по 14 августа 2023 г., когда выпало наибольшее количество осадков за неделю. Максимальные значения электропроводности получены в пробах за периоды с 21 по 28 августа и с 25 сентября по 2 октября 2023 г. На станции Высокое в эти периоды также фиксировались повышенные значения (41,0–52,0 мкСм/см).

Среднее значение pH атмосферных осадков составило 6,12, что превышает равновесную величину для атмосферных осадков (5,6). Кислотность варьировала в пределах 5,08–6,89. В 5 % проб значения были ниже 5,6. Наиболее кислотные осадки выпадали в зимний период 2023 г. (pH 5,08–6,28 со средним значением 5,81), средние значения pH в остальные сезоны составили 6,21–6,29. Коэффициент вариации значений был низким (5,3 %), что свидетельствует о достаточно однородном внутригодовом распределении содержания данного компонента.

В городах Беларуси среднегодовые значения pH в 2023 г. находились в пределах от 5,64 до 6,44. По данным НСМОС в г. Минске выпадали только нейтральные осадки [13].

В г. Высокое значения водородного показателя (рН) атмосферных осадков варьировались в диапазоне от 5,80 до 6,80, при среднем годовом 6,33, следовательно, в течение года выпадали нейтральные осадки. В г. Мстиславле диапазон значений рН был более широким и варьировался от 5,03 до 7,65, при среднем годовом 6,43; в г. Браславе – от 4,79 до 5,99, при среднем годовом 5,44 [12, 13].

Рассчитаны статистические характеристики химических элементов атмосферных осадков (табл. 1). Для всех исследуемых элементов отмечается разброс значений выше среднего. Наиболее высокие коэффициенты вариации получены для ионов калия и магния (95 и 108 % соответственно). Стандартное отклонение содержания ионов магния в атмосферных осадках выше среднего значения.

В 2023 г. содержание серы в недельных пробах осадков варьировало в пределах н. о. – 0,85 мг S/л со средним значением 0,42 мг S/л. Доля сульфатов в общей минерализации проб составила 8,9 %, что соотносится с данными НСМОС по станции Колодищи (доля сульфатов 8 %) [12, 13]. Наибольшие значения получены в пробах, отобранных в конце февраля, марте и первой половине апреля: 27.02–06.03 (0,75 мг S/л), 13.03–20.03 (0,76), 20.03–27.03 (0,71) и 10.04–17.04 (0,85 мг S/л). Минимальные значения (0,0–0,19 мг S/л) зафиксированы во второй половине января (в пробах, отобранных за период 16.01–23.01, 23.01–30.01), конце июля (24.07–31.07), середине сентября (11.09–18.09), конце октября (23.10–30.10) и в конце ноября (20.11–27.11).

Содержание нитрат-ионов в 2023 г. находилось в диапазоне 0,03–0,70 мг N/л со средним значением 0,31 мг N/л. Наибольшие значения получены в недельных пробах за период 06.02–13.02 (0,60 мг N/л), 20.03–27.03 (0,71 мг N/л) и 13.11–20.11 (0,67 мг N/л). Наименьшие значения зафиксированы в конце июля (27.07–31.07; 0,028 мг N/л) и первой половине ноября (06.11–13.11; 0,049 мг N/л).

Среднее содержание ионов аммония в 2023 г. составило 0,45 мг N/л и варьировало в пределах от 0,09 до 1,01 мг N/л. Наименьшие значения зафиксированы в конце июля (24.07–31.07), начале августа (07.08–14.08) и второй половине октября (16.10–23.10 и 23.10–30.10); наибольшие значения – в пробах, отобранных в конце февраля – начале марта (27.02–06.03) (0,96 мг N/л), середине апреля (10.04–17.04 – 0,87 мг N/л), ноябре (13.11–20.11 – 1,01 мг N/л) и середине декабря (11.12–18.12 – 0,86 мг N/л).

Среднее содержание хлоридов в атмосферных осадках на опытной площадке составило 1,9 мг/л (0,20–4,42 мг/л), ионов натрия – 0,87 мг/л (0,05–2,96 мг/л).

Соотношение ионов в атмосферных осадках на экспериментальной площадке в течение года следующее: $\text{Cl}^- > \text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^- / \text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{NH}_4^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$.

Среди анионов преобладают гидрокарбонаты и хлориды (16,5 и 17,0 % соответственно), среди катионов – натрий и кальций (12,4 и 11,7 % соответственно). Доля кислотообразующих ионов (SO_4^{2-} и NO_3^-) составила 15,4 %.

По сравнению с предыдущим годом в 2023 г. среднее содержание макрокомпонентов в атмосферных осадках сократилось практически по всем показателям, кроме магния, окисленного и восстановленного азота. Среднее содержание серы и хлоридов осталось практически на том же уровне, что и в 2022 г. В последние годы (2021–2023 г.) наблюдается сокращение среднего содержания хлоридов, гидрокарбонатов, натрия, калия и электропроводности.

Сравнение с данными наблюдений на сети станций ЕМЕП. Выполнено сопоставление данных наблюдения химического состава осадков в г. Минске с данными по содержанию загрязняющих веществ в осадках на станциях Программы ЕМЕП (табл. 2). Используются данные электронной базы данных EBAS [14, 15]. В 2023 г. данные о составе атмосферных осадков предоставили 83 станции, из них – в странах – соседях Беларуси – 12 (в Эстонии – 2, в Литве – 1, в Латвии – 1, в Польше – 4, в России – 4) [16, 17].

Сопоставление с данными сети ЕМЕП показало, что Минск находится в среднем европейском диапазоне загрязнения, ближе всего по характеристикам к станциям стран-соседей. Наиболее схожие данные получены для хлоридов, нитратов, кальция и натрия, наибольшие расхождения – для магния и калия. Однако повышенные значения аммонийного азота указывают на возможное усиленное влияние сельскохозяйственных источников в регионе.

Среднегодовое взвешенное содержание серы в атмосферных осадках в 2023 г. составило 0,39 мг S/л, окисленного азота – от 0,26 мг N/л, восстановленного азота – 0,36 мг N/л. Отмечено незначительное увеличение (серы – на 0,02 мг S/л, окисленного азота – на 0,03 мг N/л, восстановленного азота – 0,01 мг N/л) средневзвешенных концентраций данных трёх компонентов в 2023 г. по сравнению с 2022 г. Это указывает на наличие межгодовой вариабельности, обусловленной: изменениями атмосферной циркуляции, интенсивностью трансграничного переноса, локальными источниками выбросов (транспорт, энергетика, сельское хозяйство). В целом за период исследований на экспериментальной площадке с 2002 по 2023 г. сохраняется выявленный ранее в работах [7, 9] нисходящий тренд содержания серы и азота, сочетающийся с восходящим трендом величины рН осадков. За период с 2002 по 2023 г. содержание окисленной серы в атмосферных осадках сократилось на 43,1 %, окисленного

азота – на 28,7, восстановленного азота – на 28,3 %. Среднегодовые темпы сокращения составили 0,018 мг серы, 0,007 мг окисленного и 0,019 мг восстановленного азота.

Обнаружена сходная внутригодовая динамика средневзвешенных концентраций и выпадений соединений серы, нитратного и аммонийного азота на экспериментальной площадке в г. Минске и на ближайших станциях Программы ЕМЕП – Прейла и Дьябла Гора (рис. 1, а). Для всех пунктов наблюдений характерны повышенные концентрации в весенний и позднеосенний периоды и минимальные значения летом, что отражает сезонность поступления загрязняющих веществ и влияние метеорологических условий.

В г. Минске максимальные средневзвешенные концентрации серы и нитратного азота наблюдались в марте – мае и ноябре – декабре, аммонийного азота – в марте – апреле и ноябре – декабре; минимальные значения серы и нитратного азота приходились на июль, аммонийного азота – на август. Сходные сезонные закономерности отмечены и на станциях Прейла и Дьябла Гора.

Динамика выпадений в целом повторяет ряды концентраций, но отдельные пики не совпадают вследствие влияния количества осадков (например, в мае, июле и декабре) (рис. 1, б). Выявленная синхронность указывает на общность процессов переноса и вымывания соединений серы и азота, а повышенные значения в холодный период – на усиление роли отопительного сезона и антропогенных выбросов.

Общая форма сезонных колебаний для всех трёх пунктов наблюдений сходна, что указывает на общность региональных факторов формирования химического состава осадков, включая трансграничный перенос и схожие механизмы атмосферного вымывания загрязняющих веществ. Для г. Минска характерны значения концентраций серы, сопоставимые с Прейлой и превышающие уровни на Дьяблой Горе (0,39 против 0,37 и 0,22 мг S/л соответственно), тогда как по аммонийному азоту г. Минск занимает промежуточное положение между литовской и польской станциями (0,36 против 0,22 и 0,55 мг N/л) (табл. 3). Это свидетельствует о смешанном влиянии регионального переноса и локальных источников, включая транспорт и городские выбросы.

Таблица 2. Среднее содержание основных компонентов гидрохимического состава атмосферных осадков на экспериментальной площадке в г. Минске и на станциях Программы ЕМЕП, 2023 г., мг/л [16]

Table 2. Average content of the main components of the hydrochemical composition of atmospheric precipitation at the experimental site in Minsk and at the EMEP program stations, 2023, mg/l [16]

Показатель	Среднее / диапазон значений		
	Город Минск, экспериментальная площадка	Все станции Программы ЕМЕП	Станции в странах-соседях
Cl ⁻	1,93 / (0,20–4,42)	3,16 / (0,08–94,02)	1,23 / (0,26–4,06)
SO ₄ ²⁻ (S)	0,42 / (н. о.*–0,85)	0,33 / (0,08–4,22)	0,35 / (0,15–0,96)
NO ₃ ⁻ (N)	0,31 / (0,03–0,70)	0,22 / (0,04–2,10)	0,30 / (0,07–1,29)
NH ₄ ⁺ (N)	0,45 / (0,09–1,01)	0,30 / (0,02–1,43)	0,29 / (0,08–0,55)
Ca ²⁺	0,74 / (0,08–1,94)	0,54 / (0,03–5,53)	0,52 / (0,15–1,13)
Mg ²⁺	0,44 / (0,12–2,50)	0,25 / (0,01–6,61)	0,12 / (0,04–0,24)
Na ⁺	0,87 / (0,05–2,96)	1,96 / (0,06–65,41)	0,78 / (0,19–2,12)
K ⁺	0,83 / (0,10–3,85)	0,17 / (0,02–2,08)	0,20 / (0,06–0,44)
Электропроводность	23,10 / (9,90–77,30)	19,50 / (0,01–307,41)	13,45 / (4,63–31,20)
pH	6,12 / (5,08–6,89)	5,52 / (4,13–6,65)	5,16 / (4,53–5,75)

* н. о. – ниже предела обнаружения метода.

Однако при сходстве сезонных трендов абсолютные уровни выпадений в г. Минске выше, чем на обеих фоновых станциях, особенно для соединений серы и аммонийного азота. Годовые выпадения серы составили 241,2 кг/км² в г. Минске против 233,2 кг/км² в Прейле и 114,7 кг/км² на Дьяблой Горе; для NH₄⁺ (N) – 244,1 кг/км² против 135,5 и 289,4 кг/км² соответственно (табл. 3). Повышенные выпадения в г. Минске обусловлены как более высоким количеством осадков, так и возможным дополнительным вкладом локальных антропогенных источников. В то же время близость сезонной структуры выпадений подтверждает региональный масштаб процессов формирования атмосферных выпадений.

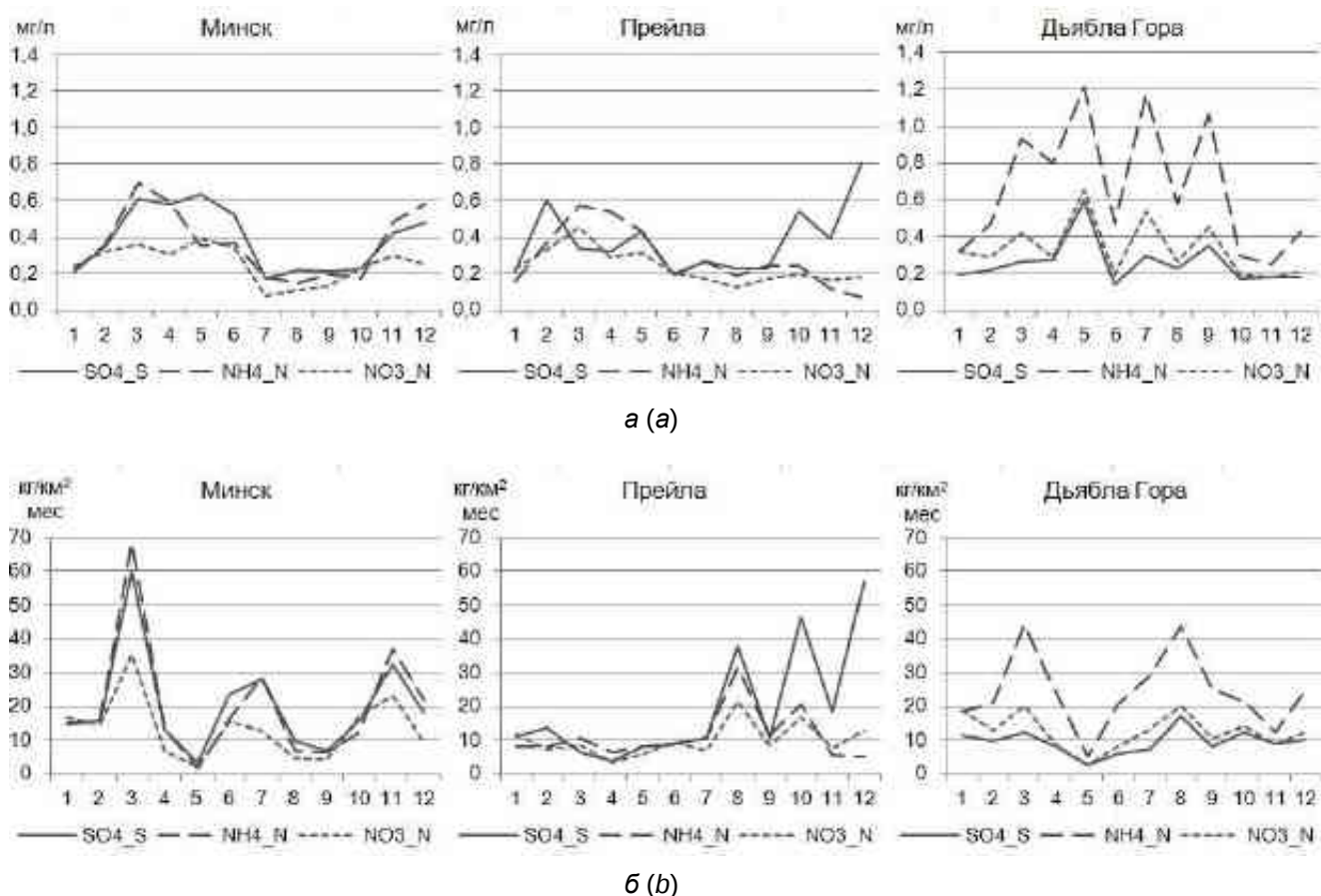


Рис. 1. Сезонная динамика средневзвешенных концентраций (а) и выпадений (б) соединений серы и азота в атмосферных осадках в г. Минске и на станциях фоновое мониторинга программы ЕМЕП – Прейла и Дьябла Гора, 2023 г.

Fig. 1. Seasonal dynamics of weighted average concentrations (a) and deposition (b) of sulfur and nitrogen compounds in atmospheric precipitation in Minsk and at the EMEP background monitoring stations – Preila and Djabla Gora, 2023

Таблица 3. Среднегодовое взвешенное содержание серы и азота в атмосферных осадках и годовые выпадения серы и азота на экспериментальной площадке в г. Минске и фоновых станциях мониторинга программы ЕМЕП –Прейла и Дьябла Гора

Table 3. Average annual weighted content of sulfur and nitrogen in atmospheric precipitation and annual deposition of sulfur and nitrogen at the experimental site in Minsk and background monitoring stations of the EMEP program – Preila and Djabla Gora

Место отбора	Количество садков, мм	Среднегодовое взвешенное содержание			Годовые выпадения, кг/км ²		
		NH ₄ ⁺ (N), мг N/л	NO ₃ ⁻ (N), мг N/л	SO ₄ ²⁻ (S), мг S/л	NH ₄ ⁺ (N)	NO ₃ ⁻ (N)	SO ₄ ²⁻ (S)
Прейла	628,14	0,22	0,19	0,37	135,5	120,1	233,2
Дьябла Гора	530,90	0,55	0,28	0,22	289,4	150,9	114,7
Минск	707,55	0,36	0,26	0,39	244,1	162,0	241,2

Во всех пунктах наблюдений выявлена синхронная внутригодовая динамика соединений серы и азота, указывающая на общность источников поступления и региональный характер атмосферного переноса загрязняющих веществ.

Сезонные максимумы концентраций и выпадений преимущественно приходятся на холодный период года, что вероятно связано с усилением выбросов в отопительный сезон и особенностями метеословий.

Минск по уровню содержания серы и азота находится в диапазоне значений станций Программы ЕМЕР и близок к станциям стран-соседей, что подтверждает сопоставимость регионального фона загрязнения. Более высокие выпадения в г. Минске по сравнению с фоновыми станциями указывают на дополнительное влияние локальных городских источников загрязнения при сохранении ведущей роли регионального переноса. Сходство динамики концентраций и выпадений на всех трёх площадках подтверждает, что химический состав атмосферных осадков в г. Минске формируется под совместным воздействием трансграничных и локальных факторов.

Сравнение полученных результатов с результатами мониторинга серы и азота в атмосферных осадках на Европейской части Российской Федерации (ЕТР). Выполнено сопоставление данных наблюдения средневзвешенных концентраций серы и азота в г. Минске с данными об их содержании в осадках двух ближайших к территории Беларуси физико-географических регионов России [18, 19].

В 2023 г. в федеральных округах Российской Федерации среднегодовые взвешенные концентрации серы в атмосферных осадках варьировали в диапазоне 1,2–4,3 мг/л, нитратного азота – 1,0–3,2, аммонийного азота – 0,3–1,0 мг/л [18, 19]. В ближайших к территории Беларуси Северо-западном федеральном округе (СЗФО) и Центральном федеральном округе (ЦФО) среднегодовые взвешенные концентрации серы составили 1,4 и 3,9 мг/л, нитратного азота – 1,0 и 1,8, аммонийного азота – 0,3 и 0,7 мг/л соответственно. Средневзвешенные концентрации серы и азота в СЗФО наиболее близки к полученным нами значениям в г. Минске.

Сравнение с данными НСМОС. В Республике Беларусь по данным на 2023 г. наблюдения за химическим составом атмосферных осадков проводились на 22 пунктах наблюдений НСМОС [12, 13]. В г. Минске в 2023 г. общая минерализация проб атмосферных осадков составила 12 мг/л, из которых на долю сульфатов приходилось 8 %. В соответствии с имеющимися данными, в период с 2020 по 2023 г. наблюдалась сходимость рядов среднегодового содержания серы в атмосферных осадках на станции НСМОС в г. Минске и в рамках нашего исследования. Кроме того, отмечается схожая тенденция к сокращению среднегодовых концентраций серы в указанный период.

Химический состав снежного покрова на экспериментальной площадке в 2023 г. Зимний период 2022–2023 гг. отличается неустойчивым снежным покровом с несколькими периодами его устойчивого залегания. Осадки в виде снега, мокрого снега с дождём выпадали несколько раз в ноябре – декабре; начиная с 17 ноября 2022 г. образовался снежный покров, который полностью растаял к 23 декабря 2022 г. Снег в первый период на опытной площадке залегал в течение 37–38 дней. Затем 25 декабря опять выпал снег, который пролежал до марта. Дата полного схода снежного покрова на экспериментальной площадке – 15 марта 2023 г.

За зимний период 2022–2023 гг. на экспериментальной площадке отобрано и проанализировано 9 проб снега на всю толщину снежного покрова. 2 пробы отобраны в декабре 2022 г. в первый период залегания снега и 7 проб – в конце декабря 2022 г. – марте 2023 г. после повторного образования устойчивого снежного покрова. Средняя высота снежного покрова на экспериментальной площадке составила 20,5 см, влагозапас – 40,8 кг/м².

Минерализация снеговой воды в 2022–2023 гг. варьировала в диапазоне 5,5–14,8 мг/л и в среднем составила 9,5 мг/дм³, что немного ниже по сравнению со средним значением предыдущего зимнего периода 2021–2022 гг. (10,2 мг/л) и ниже средних значений зимних периодов с 2016–2017 по 2020–2021 гг. (11,0–24,6 мг/л). Коэффициент вариации значений невысокий и составил 33 %.

По результатам опробования среднее значение pH в период залегания снежного покрова в 2022–2023 гг. достигло 5,97 при минимальном значении – 5,71 и максимальном – 6,21 (табл. 4). По данным НСМОС, в городах Беларуси значения pH колебались в пределах от 5,2 до 6,1. Минимальное значение (5,10) отмечено в снежном покрове в г. п. Езерище, максимальное (6,59) – в г. Костюковичи [13].

Согласно данным [19], на более чем 60 % территории Российской Федерации среднемесячный показатель pH по регионам в зимний период 2022–2023 гг. находился в пределах 5,5–6,5; в ближайших к Беларуси регионах он составил 6,0–7,0.

Содержание окисленной серы в пробах снежного покрова фиксировалось от 0,22 до 0,42 мг S/л со средним значением 0,31 мг S/л. Среднее значение окисленного азота в пробах снежного покрова, отобранных по г. Минску, составило 0,35 мг N/л и варьировало от 0,22 до 0,46 мг N/л. Содержание восстановленного азота в пробах снежного покрова фиксировалось на уровне от 0,15 до 0,29 мг N/дм³ (в среднем 0,22 мг N/л).

Таблица 4. Гидрохимический состав снеговых вод на постоянной экспериментальной площадке на территории г. Минска в зимний период 2022–2023 гг.**Table 4.** Hydrochemical composition of snow waters at a permanent experimental site in the city of Minsk in the winter period of 2022–2023

Параметр	HCO_3^-	Cl^-	$\text{SO}_4^{2-}(\text{S})$	$\text{NO}_3^-(\text{N})$	$\text{NH}_4^+(\text{N})$	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+	pH	Электропроводность, мкСм/см
Среднее, мг/л	2,5	2,7	0,31	0,35	0,22	0,75	0,30	1,59	0,74	5,97	23,05
Коэффициент вариации, %	70,3	24,0	25,0	22,9	18,8	48,6	34,4	36,0	58,0	2,7	21,5

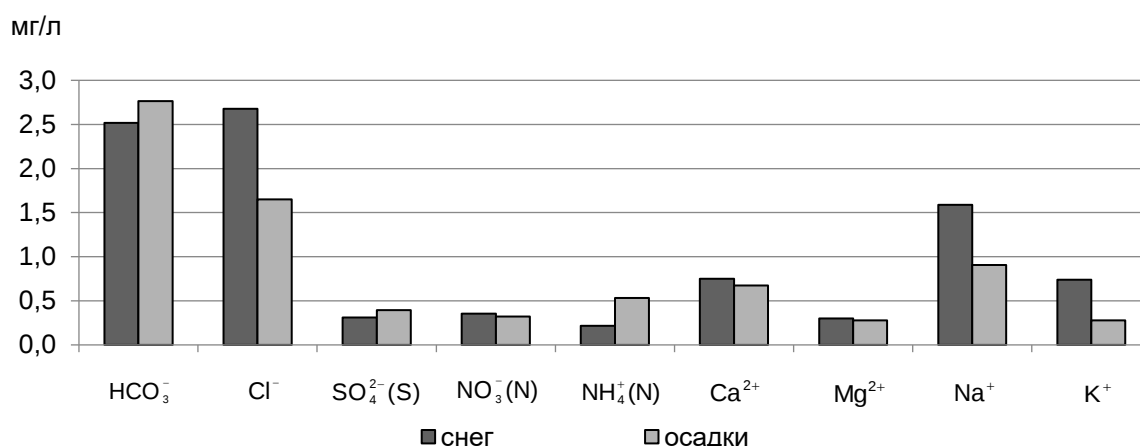
Среднее содержание хлоридов в снеге на опытной площадке составило 2,7 мг/л (1,94–3,61 мг/л). Полученные значения близки к данным НСМОС, которые в городах Беларуси фиксировались на уровне от менее чем 1,0 мг/л до 3,3 мг/л (г. Полоцк) [13].

Содержание ионов натрия в пробах снежного покрова на экспериментальной площадке во дворе Института природопользования НАН Беларуси составило 0,85–2,55 мг/л со средним значением 1,59 мг/л. По данным НСМОС в городах Витебске, Гомеле, Горках, Костюковичах, Минске, Мозыре, Полоцке, Славгороде и г. п. Езерище концентрации натрия варьировались в диапазоне 1,19–1,67 мг/л [13].

По всем показателям химического состава снежного покрова на постоянной экспериментальной площадке на территории Института природопользования НАН Беларуси в зимний период 2022–2023 гг. разброс значений был ниже среднего (см. табл. 4); исключение – гидрокарбонаты и калий (коэффициенты вариации составили 70,3 и 58,0 % соответственно).

По сравнению с 2021–2022 гг., в 2022–2023 гг. наблюдалось увеличение среднего содержания по следующим компонентам гидрохимического состава снежного покрова: среднее содержание хлоридов – на 0,68 мг/л, нитратов – на 0,02 мг N/л, кальция – 0,12 мг/л, магния – на 0,03, натрия – 0,31, калия – на 0,26 мг/л. В то же время среднее содержание гидрокарбонатов в снеге сократилось на 0,1 мг/л, сульфатов – на 0,08 мг S/л, аммонийного азота – 0,14 мг N/л, в том числе и по сумме ионов – на 0,79 мг/л; среднее значение показателя pH уменьшилось на 0,51.

Средние концентрации основных ионов в атмосферных осадках (за период залегания снега) и в снежном покрове имеют схожие значения по ряду показателей. Наибольшие отличия наблюдаются в средних концентрациях восстановленного азота (в осадках в 2,4 раза выше, чем в снеге), хлоридов, калия и натрия – средние значения этих показателей в снежном покрове в 1,6–2,7 раза выше, чем в пробах атмосферных осадков за период залегания снежного покрова (рис. 2).

**Рис. 2.** Сравнительное содержание основных ионов в атмосферных осадках (средние за период залегания снега) и снежном покрове на экспериментальной площадке, 2022–2023 гг.**Fig. 2.** Comparative content of the main ions in atmospheric precipitation (average for the period of snow cover) and snow cover at the experimental site, 2022–2023

Заключение. Выполненное исследование позволило охарактеризовать особенности химического состава атмосферных осадков и снежного покрова на основе анализа результатов мониторинга химического состава атмосферных осадков на экспериментальной площадке Института природопользования НАН Беларуси в 2023 г. и сравнить их с осуществлёнными ранее исследованиями.

Проведённое исследование позволило выявить ряд дополнительных закономерностей. Установлено снижение общей минерализации атмосферных осадков при сохранении годового количества осадков, что может свидетельствовать о снижении аэрозольной нагрузки, однако влияние метеорологических факторов также существенно. Долгосрочные тренды показывают уменьшение содержания соединений серы и азота, однако в 2023 г. отмечены межгодовые колебания. Реакция среды осадков остаётся преимущественно нейтральной, что обусловлено влиянием нейтрализующих компонентов. Синхронность динамики серы и азота подтверждает их общее происхождение.

В снежном покрове выявлено значительное влияние антропогенных факторов, особенно в городской среде, где зафиксировано повышенное содержание хлоридов и натрия.

Сопоставление данных наблюдений химического состава осадков в г. Минске с содержанием на станциях Программы ЕМЕП показало, что в целом диапазон средних годовых концентраций серы и азота в атмосферных осадках в г. Минске укладывается в диапазон изменений концентраций этих компонентов на станциях ЕМЕП. Наиболее заметное отклонение среднегодового содержания в атмосферных осадках в г. Минске от диапазона колебаний концентраций в рассматриваемый период на указанных станциях ЕМЕП характерно для магния и калия.

Благодарности. Работа выполнена в рамках задания подпрограммы 1 «Природные ресурсы и их рациональное использование» государственной программы научных исследований «Природные ресурсы и окружающая среда» на 2021–2025 гг. (№ госрегистрации 20210126).

Acknowledgements. The study has been performed within the Task of the Subprogram 1 “Natural resources and their rational use” of the State Program of Scientific Investigations “Natural Resources and Environment” for 2021–2025 (State registration No. 20210126).

Список использованных источников

1. Chemical composition characteristics and source contributions of precipitation in typical cities on the north slope of Tianshan mountain in Xinjiang during 2010–2019 / Yuting Zhong, Xia Li, Ziang Fan [et al.] // *Atmosphere*. – 2022. – Vol. 13, № 5. – Art. 646. – DOI: 10.3390/atmos13050646.
2. A global assessment of precipitation chemistry and deposition of sulfur, nitrogen, sea salt, base cations, organic acids, acidity and pH, and phosphorus/ R. Vet, R. S. Artz, S. Carou [et al.] // *Atmospheric Environment*. – 2014. – Vol. 93. – P. 3–100. – DOI: 10.1016/j.atmosenv.2013.10.060.
3. Assessing the neutralisation, wet deposition and source contributions of the precipitation chemistry over Europe during 2000–2017 / Á. Keresztesi, M.-V. Birsan, I.-A. Nita [et al.] // *Environmental Sciences Europe*. – 2019. – Vol. 31, № 1. – Art. 50. – DOI: 10.1186/s12302-019-0234-9.
4. Еремина, И. Д. Химический состав атмосферных осадков в Москве и тенденции его многолетних изменений / И. Д. Еремина // *Вестник Московского университета. Серия 5, География*. – 2019. – № 3. – С. 3–10.
5. Mouli P.C Rainwater chemistry at a regional representative urban site: influence of terrestrial sources on ionic composition / P. C. Mouli, S. V. Mohan, S. J. Reddy // *Atmospheric Environment*. – 2005. – Vol. 39. – P. 999–1008. – DOI: 10.1016/j.atmosenv.2004.10.036.
6. Fagerli, H. Trends of nitrogen in air and precipitation: Model results and observations at EMEP sites in Europe, 1980–2003 / H. Fagerli, W. Aas // *Environmental Pollution*. – 2008. – Vol. 154 (3). – P. 448–461. – DOI: 10.1016/j.envpol.2008.01.024.
7. Какарека, С. В. Особенности химического состава атмосферных осадков в г. Минске в 2018–2022 гг. / С. В. Какарека, Ю. Г. Кокош, М. А. Кудревич // *Природопользование*. – 2024. – № 1. – С. 41–53. – DOI: 10.47612/2079-3928-2024-1-41-53.
8. Какарека С. В. Многолетняя динамика содержания серы и азота в снежном покрове в Минске / С. В. Какарека, Ю. Г. Кокош, М. А. Кудревич // *Метеорология и гидрология*. – 2024. – № 10. – С. 88–101.
9. Какарека, С. В. Тренды содержания закисляющих и эвтрофирующих соединений в атмосферных осадках на урбанизированной территории / С. В. Какарека, Ю. Г. Кокош, М. А. Кудревич // *Доклады НАН Беларуси*. – 2021. – Т. 65, № 6. – С. 724–733. – DOI: 10.29235/1561-8323-2021-65-6-724-733.
10. Manual for the GAW precipitation chemistry programme // QA/SAC – Americas. – URL: https://s3.us-east-2.amazonaws.com/envirovantage/GAW-PrecipChemManualNo160_Ammended15Oct2015.pdf (date of access: 24.06.2021).
11. EMEP Manual for sampling and chemical analysis. EMEP/CCC Report 1/95, Revision 2001. – Kjeller ; Lillestrøm : Norwegian Institute for Air Research, 2001. – 303 p.

12. Ежегодник состояния атмосферного воздуха. 2023 год. Химический состав атмосферных осадков // Республиканский центр по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения и мониторингу окружающей среды. – Мн., 2024. – URL: <https://rad.org.by/articles/vozduh/ezhegodnik-sostoyaniya-atmosfernogo-vozduha-2023/himicheskiy-sostav-atmosfernyh-osadkov.html> (дата обращения: 12.03.2025).
13. Национальная система мониторинга окружающей среды. Результаты наблюдений НСМОС за 2023 г. Мониторинг атмосферного воздуха : [сайт]. – Мн., 2024. – URL: <https://www.nsmos.by/sites/default/files/2024-06/4-monitoring-atmosfernogo-vozdukha.pdf> (дата обращения: 24.01.2024).
14. EMEP/CCC Reports 2020–2023 : [site]. – [Kjeller], 2024. – URL: <https://projects.nilu.no/ccc/reports.html> (date of access: 04.02.2024).
15. EBAS Home, 2024 : [site]. – [Kjeller], 2024. – URL: <https://ebas.nilu.no/> (date of access: 12.03.2024)
16. Hjellbrekke, A.-G. Data Report 2023. Particulate matter, carbonaceous and inorganic compounds / A.-G. Hjellbrekke. – Kjeller : NILU, 2025. – 172 p. – (EMEP/CCC-Report 1/2025).
17. EMEP MSC-W modelled air concentrations and depositions, 2024 : [site]. – [Oslo], 2024. – URL: https://emep.int/mscw/mscw_moddata.html (date of access: 18.03.2024).
18. Обзор фонового состояния окружающей природной среды на территории стран СНГ за 2023 г. / под ред. Г. М. Черногаевой. – М. : Росгидромет, 2024. – 135 с.
19. Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2023 год / Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды ; под ред. Г. М. Черногаевой. – М. : Росгидромет, 2024. – URL: <http://downloads.igce.ru/publications/reviews/review2024.pdf> (дата обращения: 21.05.2026).

References

1. Zhong Yuting, Li Xia, Fan Ziang, Ayitken Maulen, Li Shuting, Liu Xinchun. Chemical composition characteristics and source contributions of precipitation in typical cities on the north slope of Tianshan mountain in Xinjiang during 2010–2019. *Atmosphere*, 2022, vol. 13, no. 5, art. 646, DOI: 10.3390/atmos13050646.
2. Vet R., Artz R. S., Carou S., e. a. A global assessment of precipitation chemistry and deposition of sulfur, nitrogen, sea salt, base cations, organic acids, acidity and pH, and phosphorus, *Atmospheric Environment*, 2014, vol. 93, pp. 3–100, DOI: 10.1016/j.atmosenv.2013.10.060.
3. Keresztesi Á., Birsan M.-V., Nita I.-A., Bodor Z., Robert S. Assessing the neutralisation, wet deposition and source contributions of the precipitation chemistry over Europe during 2000–2017. *Environmental Sciences Europe*, 2019, vol. 31, no. 1, art. 50, DOI: 10.1186/s12302-019-0234-9.
4. Eremina I. D. *Khimicheskii sostav atmosferykh osadkov v Moskve i tendentsii ego mnogoletnikh izmenenii* [Chemical composition of atmospheric precipitation in Moscow and the trends of its long-term changes]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5, Geografiya = Bulletin of Moscow University. Series 5. Geography*, 2019, no. 3, pp. 3–10. (in Russian)
5. Mouli P. C., Mohan S. V., Reddy S. J. Rainwater chemistry at a regional representative urban site: influence of terrestrial sources on ionic composition. *Atmospheric Environment*, 2005, vol. 39, pp. 999–1008. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2004.10.036.
6. Fagerli H., Aas W. Trends of nitrogen in air and precipitation: Model results and observations at EMEP sites in Europe 1980–2003. *Environmental Pollution*, 2008, vol. 154, pp. 448–461. DOI: 10.1016/j.envpol.2008.01.024.
7. Kakareka S. V., Kokosh Yu. G., Kudrevich M. A. *Osobennosti khimicheskogo sostava atmosferykh osadkov v g. Minske v 2018–2022 gg.* [Features of the chemical composition of atmospheric precipitation in Minsk in 2018–2022]. *Prirodopol'zovanie = Nature Management*, 2024, no. 1, pp. 41–53, DOI: 10.47612/2079-3928-2024-1-41-53. (in Russian)
8. Kakareka S. V., Kokosh Yu. G., Kudrevich M. A. *Mnogoletnyaya dinamika sodержaniya sery i azota v snezhnom pokrove v Minske* [Long-term dynamics of sulfur and nitrogen content in snow cover in Minsk]. *Meteorologiya i gidrologiya = Russian Meteorology and Hydrology*, 2024, no. 10, pp. 88–101. (in Russian)
9. Kakareka S. V., Kokosh Yu. G., Kudrevich M. A. *Trendy sodержaniya zakislyayushchikh i evtrofiruyushchikh soedineniy v atmosferykh osadkakh na urbanizirovannoy territorii* [Trends in the content of acidifying and eutrophying compounds in atmospheric precipitation in an urbanized area]. *Doklady NAN Belarusi = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2021, vol. 65, no. 6, pp. 724–733, DOI: 10.29235/1561-8323-2021-65-6-724-733. (in Russian)
10. Manual for the GAW precipitation chemistry programme. QA/SAC – Americas. URL: https://s3.us-east-2.amazonaws.com/envirovantage/GAW-PrecipChemManualNo160_Ammended15Oct2015.pdf. (accessed June 24, 2021).
11. EMEP Manual for sampling and chemical analysis. *EMEP/CCC Report 1/95, Revision 2001*. Kjeller, Lillestrøm, Norwegian Institute for Air Research Publ., 2001, 303 p.
12. *Yezhegodnik sostoyaniya atmosfernogo vozdukha. 2023 god. Khimicheskii sostav atmosferykh osadkov* [Yearbook of the state of atmospheric air. 2023. Chemical composition of atmospheric precipitation]. Minsk, Republican Center for Hydrometeorology, Control of Radioactive Contamination and Environmental Monitoring Publ., 2024.

- URL: <https://rad.org.by/articles/vozduh/ezhegodnik-sostoyaniya-atmosfernogo-vozduha-2023/himicheskiy-sostav-atmosfernyh-osadkov.html> (accessed March 12, 2025). (in Russian)
13. *Natsional'naya sistema monitoringa okruzhayushchey sredy. Rezul'taty nablyudeniy NSMOS za 2023 g. Monitoring atmosfernogo vozdukha* [National environmental monitoring system. Results of NSMOS observations for 2023. Ambient air monitoring]: [site]. Minsk, 2024. URL: <https://www.nsmos.by/sites/default/files/2024-06/4-monitoring-atmosfernogo-vozdukha.pdf> (accessed January 24, 2024). (in Russian)
 14. EMEP/CCC Reports 2020–2023: [site]. Kjeller, 2024. URL: <https://projects.nilu.no/ccc/reports.html>. (accessed February 4, 2024).
 15. EBAS Home, 2024: [site]. Kjeller, 2024. URL: <https://ebas.nilu.no/> (accessed March 12, 2024).
 16. Hjellbrekke, A.-G. Data Report 2023. Particulate matter, carbonaceous and inorganic compounds (EMEP/CCC-Report 1/2025). Kjeller, NILU Publ., 172 p.
 17. EMEP MSC-W modelled air concentrations and depositions, 2024: [site]. Oslo, 2024. URL: https://emep.int/mscw/mscw_moddata.html (accessed March 18, 2024).
 18. *Obzor fonovogo sostoyaniya okruzhayushchey prirodnoy sredy na territorii stran SNG za 2023 g.* [Review of the background state of the natural environment in the CIS countries for 2023]. Ed. by G. M. Chernogaeva. Moscow, Rosgidromet Publ., 2024, 135 p. (in Russian)
 19. *Obzor sostoyaniya i zagryazneniya okruzhayushchey sredy v Rossiyskoy Federatsii za 2023 god* [Review of the state and pollution of the environment in the Russian Federation for 2023]. Ed. by G. M. Chernogaeva. Moscow, Rosgidromet Publ., 2025. Available at: <http://downloads.igce.ru/publications/reviews/review2024.pdf> (accessed May 21, 2026). (in Russian)

Информация об авторах

Кокош Юлия Геннадьевна – кандидат географических наук, старший научный сотрудник лаборатории трансграничного загрязнения, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: y-kokosh@mail.ru

Кудревич Мария Александровна – научный сотрудник лаборатории трансграничного загрязнения, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: kudrevich.mary.1991@gmail.com

Information about the authors

Yuliya G. Kokosh – Senior Researcher of Laboratory of Transboundary Pollution, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny St., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: y-kokosh@mail.ru

Mariya A. Kudrevich – Researcher of Laboratory of Transboundary Pollution, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny St., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: kudrevich.mary.1991@gmail.com