

<https://doi.org/10.47612/2079-3928-2024-1-41-53>
УДК 550.4+504.5(476)

Поступила в редакцию 15.04.2024
Received 15.04.2024

ОСОБЕННОСТИ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА АТМОСФЕРНЫХ ОСАДКОВ В МИНСКЕ В 2018–2022 гг.

С. В. Какарека, Ю. Г. Кокош, М. А. Кудревич

Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Аннотация. Охарактеризованы особенности химического состава атмосферных осадков на территории г. Минска за период с 2018 по 2022 г. на основе анализа результатов мониторинга химического состава атмосферных осадков на экспериментальной площадке Института природопользования НАН Беларуси. Основное внимание уделено соединениям серы и азота – основным закисляющим и эвтрофирующим соединениям в атмосферных осадках.

Установлено, что среднегодовые взвешенные содержания серы в атмосферных осадках за исследуемый период варьировали от 0,29 мг S/л (2018 г.) до 0,47 мг S/л (2021 г.), окисленного азота – от 0,21 мг N/л (2019 г.) до 0,43 мг N/л (2020 г.), восстановленного азота – от 0,20 мг N/л (2019 г.) до 0,89 мг N/л (2020 г.).

Выполнено сопоставление данных наблюдений химического состава осадков в г. Минске с динамикой содержания серы и азота в осадках на станциях Совместной программы наблюдений и оценки переноса на большие расстояния загрязняющих веществ в Европе (Программы ЕМЕП); основное внимание уделено станциям, расположенным в странах-соседах Беларуси. Наиболее заметное отклонение среднегодового содержания в атмосферных осадках в г. Минске от диапазона колебаний концентраций в рассматриваемый период на станциях ЕМЕП характерно для восстановленного азота в 2020 г.

Величины сухих и влажных выпадений серы и азота по данным наблюдений близки расчетным значениям, полученным в рамках Программы ЕМЕП. Установлено, что модельные величины годовых влажных выпадений в целом близки расчетным по данным мониторинга на экспериментальной площадке. Максимальные уровни выпадений как серы, так и азота, согласно моделированию по Программе ЕМЕП, характерны для 2020 г.; для этого же года характерны пиковые уровни выпадений и по данным измерений на экспериментальной площадке.

Выявлена сходимость рядов годового средневзвешенного содержания серы в осадках в г. Минске и на станциях фонового мониторинга Европейской территории России (ЕТР).

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

Для цитирования. Какарека С. В., Кокош Ю. Г., Кудревич М. А. Особенности химического состава атмосферных осадков в Минске в 2018–2022 гг. // Природопользование. – 2024. – № 1. – С. 41–53.

FEATURES OF THE CHEMICAL COMPOSITION OF ATMOSPHERIC PRECIPITATION IN MINSK IN 2018–2022

S. V. Kakareka, Yu. G. Kokosh, M. A. Kudrevich

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

Abstract. The features of the chemical composition of atmospheric precipitation on the territory of Minsk for the period from 2018 to 2022 are characterized based on an analysis of the results of monitoring the chemical composition of atmospheric precipitation at the experimental site of the Institute of Environmental Management of the National Academy of Sciences of Belarus. The main attention is paid to sulfur and nitrogen compounds – the major acidifying and eutrophication compounds in atmospheric precipitation.

It was established that the average annual suspended sulfur content in precipitation during the study period varied from 0.29 mg S/l (2018) to 0.47 mg S/l (2021), oxidized nitrogen – from 0.21 mg N/l (2019) to 0.43 mg N/l (2020), reduced nitrogen – from 0.20 mg N/l (2019) to 0.89 mg N/l (2020).

A comparison was made of observation data on the chemical composition of precipitation in Minsk with the dynamics of sulfur and nitrogen content in precipitation at Co-operative Programme for Monitoring and Evaluation of the long-range transmissions of air pollutants in Europe (EMEP Program) stations; the main attention is paid to stations located in neighboring countries

to Belarus. The most noticeable deviation of the average annual content in atmospheric precipitation in Minsk from the range of concentration fluctuations during the period under review at EMEP stations is typical for refurbished nitrogen in 2020.

The comparison was made of the values of atmospheric deposition of sulfur and nitrogen based on observation data on the chemical composition of atmospheric precipitation in Minsk with the calculated values of dry and wet deposition of sulfur and nitrogen obtained within the framework of the EMEP Program. It has been established that the model values of annual wet deposition are generally close to those calculated from monitoring data at the experimental site. The maximum levels of the deposition of both sulfur and nitrogen, according to modeling by the EMEP Program, are typical for 2020; for the same year is characterized by peak levels of fallout and according to measurements at the experimental site.

The convergence of series of annual weighted average sulfur content in precipitation in Minsk and at background monitoring stations in the European territory of Russian Federation (ETR) was revealed.

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

For citation. Kakareka S. V., Kokosh Yu. G., Kudrevich M. A. Features of the chemical composition of atmospheric precipitation in Minsk in 2018–2022. *Nature Management*, 2024, no. 1, pp. 41–53.

Введение. Химический состав осадков является интегральной характеристикой загрязнения приземного слоя атмосферы. Осадки представляют собой значительную часть всех атмосферных выпадений, оказывая влияние на состояние почв, экосистем и поверхностных вод, что, в свою очередь, влияет на здоровье человека. Изучение химического состава атмосферных осадков позволяет получить важные данные о составе атмосферы, выявить источники и пути распространения загрязняющих веществ. Таким образом, атмосферные осадки являются важным индикатором качества атмосферного воздуха и могут быть использованы для мониторинга загрязнения окружающей среды.

Исследования химического состава атмосферных осадков привели к выявлению неоднородности выпадения химических элементов в пространстве и времени. Факторы, влияющие на уровни осадков, включают тип, интенсивность и распределение природных источников химических веществ в атмосферу, природные условия, атмосферную циркуляцию, процессы переноса и удаления химических веществ из атмосферы, а также интенсивность промышленной, сельскохозяйственной и транспортной деятельности.

Данные литературных источников свидетельствуют о разнообразии химических элементов, присутствующих в атмосферных осадках, выпадающих в различных местах [1–5]. Исследования показали, что анализ химического состава дождевой воды в определенном месте или регионе позволяет оценить локальное и региональное распространение загрязняющих веществ с атмосферными потоками [6].

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 [3, 4, 6, 7]). 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 площадке стали проводить, начиная с 2002 г. В ранее опубликованной статье [8] обобщены полученные данные и проанализированы тренды химического состава атмосферных осадков за период с 2002 по 2019 г. Данная статья посвящена анализу особенностей химического состава атмосферных осадков на территории г. Минска за период с 2018 по 2022 г. Основное внимание уделено соединениям серы и азота – основным закисляющим и эвтрофирующим соединениям в атмосферных осадках.

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

Материалы и методы исследований. Экспериментальная площадка расположена в черте г. Минска на территории Института природопользования НАН Беларуси [8]. При формировании программы наблюдений учитывали рекомендации Глобальной службы атмосферы (ГСА) [9] и Программы ЕМЕП [10].

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. Это 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 теплое время года использовали летний вариант осадкосборника.

Экспериментальные результаты сопоставляли с результатами измерений на станциях Программы ЕМЕП в Европе, а также на станции комплексного фоновых мониторинга «Березинский заповедник».

При проведении химических испытаний проб осадков использовали действующие технические нормативные правовые акты Республики Беларусь (ТНПА) и методики выполнения измерений (МВИ), прошедшие аттестацию и предназначенные для применения в сфере законодательной метрологии, а также средства измерения и испытательное оборудование, прошедшее поверку и калибровку. 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], а также путем участия в лабораторных сличительных испытаниях, проводимых Центром обеспечения качества и научной деятельности ГСА.

Содержание сульфатов определяли турбидиметрическим методом (СТБ 17.13.05-42-2015), нитратов и нитритов, ионов аммония – фотометрическим (ГОСТ 33045-2014), величину pH – потенциометрическим методом (СТБ ISO 10523-2009).

В период с 2018 по 2022 г. отобрали 197 проб. Средний объем пробы составил 523,2 мл с диапазоном 10–2910 мл. В пробах атмосферных осадков объемом менее 50 мл были определены только значения кислотности и удельной электропроводности.

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

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

Результаты и их обсуждение. За период с 2018 по 2022 г. на экспериментальной площадке во дворе Института природопользования НАН Беларуси ежегодно выпадало от 592,6 до 707,5 мм осадков. Наибольшее количество осадков выпадало в летние месяцы и составило 30–46 % суммы годовых осадков. Наименьшее количество осадков за рассматриваемый период, за исключением 2022 г., – в весенние месяцы. В 2022 г. наибольшее количество осадков также выпало в летний период (31 %), наименьшее – в весенний (22 %) и осенний (23 %) периоды года.

В разрезе месячных значений суммы осадков колебались от 1,7 до 170,5 мм со средним значением 52,5 мм. Наименьшие месячные суммы осадков (1,7–19,2 мм) зафиксированы в феврале и апреле 2018 и 2019 г., марте и апреле 2020 г., октябре 2021 г., марте 2022 г. Наибольшее количество осадков (123,6–170,5 мм) выпало в июле 2018 и 2019 г., июне 2020 г., сентябре 2021 г. и июле 2022 г.

Наибольшая вариабельность месячных сумм осадков характерна для 2019 г., когда выпало наименьшее (в апреле – 1,7 мм) и наибольшее (в июле – 144,6 мм) их количество за период.

В зависимости от объема пробы, необходимого для химико-аналитического определения гидрохимического состава, проанализированы 124–178 проб. Статистические характеристики содержания основных ионов, кислотности, электропроводности атмосферных осадков на постоянной площадке в 2018–2022 г. приведены в табл. 1.

Статистические характеристики содержания серы и азота в атмосферных осадках (недельные пробы) на постоянной площадке за исследуемый период по годам приведены в табл. 2.

В 2018 г. содержание серы в осадках варьировало в пределах н. о.–1,40 мг S/л со средним значением 0,37 мг S/л. Наибольшие значения зафиксированы в пробах, отобранных во второй половине января: 15.01–22.01 (0,78 мг S/л) и 22.01–29.01 (1,12 мг S/л), марте – 05.03–12.03 (0,97 мг S/л) и 26.03–31.03 (1,40 мг S/л) и второй половине апреля и мае: 23.04–30.04 (0,67 мг S/л) и 14.05–21.05 (0,70 мг S/л). Минимальные значения зафиксированы в июле (в пробах, отобранных за периоды 29.06–04.07, 09.07–16.07 и 23.07–30.07), и сентябре (пробы за периоды 10.09–17.09 и 17.09–24.09).

Содержание нитрат-ионов в 2018 г. находилось в диапазоне 0,02–0,91 мг N/л со средним значением 0,34 мг N/л. Коэффициент вариации значений составил 73,3 %. Наибольшие значения получены в пробах за периоды 22.01–29.01 (0,79 мг N/л), 23.04–30.04 (0,91 мг N/л) и 11.06–18.06 (0,76 мг N/л). Наименьшие значения фиксировались в июле (29.06–04.07 и 23.07–30.07), второй половине августа (13.08–20.08 и 20.08–27.08) и сентябре (10.09–17.09 и 24.09–30.09).

Таблица 1. Статистические параметры гидрохимического состава атмосферных осадков на постоянной площадке, 2018–2022 г., мг/л**Table 1. Statistical parameters of the hydrochemical composition of atmospheric precipitation at the permanent site, 2018–2022, mg/l**

Параметр	SO ₄ ²⁻ (S)	Cl ⁻	NO ₃ ⁻ (N)	HCO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺ (N)	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Сумма ионов	pH	Электропроводность, мкСм/см
Среднее	0,54	3,07	0,42	8,57	0,69	1,81	2,67	1,70	0,58	18,63	6,34	43,16
Медиана	0,33	2,14	0,27	4,15	0,42	0,90	0,94	1,06	0,34	11,56	6,28	28,07
Стандартное отклонение	0,70	3,58	0,80	15,16	1,16	3,42	5,75	2,26	0,75	22,78	0,52	45,30
Дисперсия выборки	0,49	12,80	0,64	229,94	1,34	11,71	33,02	5,10	0,56	518,88	0,27	2051,82
Минимум	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	0,60	4,33	3,14
Максимум	4,99	24,46	1,75	107,40	12,52	27,00	45,20	11,22	3,89	170,79	7,80	252,00
Количество проанализированных проб	161	150	163	136	158	164	161	124	124	167	175	178
Коэффициент вариации	130,7	116,4	192,3	176,9	169,1	188,8	215,6	132,5	127,8	122,3	8,1	104,9

Примечание: н. о. – ниже предела обнаружения метода.

Таблица 2. Статистические параметры содержания серы, окисленного и восстановленного азота и pH в пробах атмосферных осадков на постоянной площадке, 2018–2022 г., мг/л**Table 2. Statistical parameters of sulfur content, oxidized and reduced nitrogen and pH in atmospheric precipitation samples at a permanent site, 2018–2022, mg/l**

Показатель	Год	Среднее	Медиана	Стандартное отклонение	Дисперсия выборки	Минимум	Максимум	Коэффициент вариации	Количество проб
SO ₄ ²⁻ (S)	2018	0,37	0,33	0,37	0,14	н. о.*	1,40	101,6	28
	2019	0,51	0,36	0,59	0,35	н. о.	2,42	115,4	25
	2020	0,72	0,42	0,89	0,79	н. о.	4,99	123,9	37
	2021	0,65	0,37	0,85	0,73	н. о.	4,41	130,6	34
	2022	0,39	0,25	0,54	0,29	н. о.	2,23	138,8	37
NO ₃ ⁻ (N)	2018	0,34	0,27	0,25	0,06	0,02	0,91	73,3	28
	2019	0,37	0,19	0,40	0,16	н. о.	1,47	109,8	26
	2020	0,67	0,35	1,55	2,39	н. о.	9,73	232,0	38
	2021	0,42	0,30	0,38	0,14	0,05	1,75	91,0	36
	2022	0,24	0,21	0,17	0,03	н. о.	0,62	73,0	35
NH ₄ ⁺ (N)	2018	0,38	0,28	0,40	0,16	н. о.	1,44	104,8	27
	2019	0,38	0,16	0,48	0,23	н. о.	1,60	126,7	25
	2020	1,22	0,83	2,00	4,00	0,07	12,52	164,6	38
	2021	0,89	0,61	0,96	0,91	0,10	5,24	107,0	31
	2022	0,38	0,26	0,37	0,13	н. о.	1,48	95,7	36
pH	2018	6,45	6,51	0,41	0,17	5,42	7,08	6,4	27
	2019	6,20	6,17	0,37	0,14	5,64	6,96	5,9	25
	2020	6,41	6,44	0,64	0,41	4,63	7,80	10,0	43
	2021	6,20	6,21	0,54	0,29	4,33	7,41	8,7	41
	2022	6,44	6,28	0,45	0,20	5,87	7,68	7,0	39

Примечание: н. о. – ниже предела обнаружения метода.

Среднее содержание ионов аммония в 2018 г. составило 0,38 мг N/л и варьировало в пределах от н. о. до 1,44 мг N/л. Наименьшие значения фиксировались в январе (15.01–22.01, 22.01–29.01), марте (01.03–05.03), июне – июле (18.06–25.06, 29.06–04.07, 09.07–16.07). Наибольшие значения зафиксированы в пробах, отобранных в марте и середине апреля – мае (05.03–12.03 – 1 мг N/л, 26.03–31.03 – 0,90 мг N/л, 23.04–30.04 – 1,44 мг N/л, 14.05–21.05 – 1,28 мг N/л).

В 2019 г. содержание серы варьировало в пределах н. о.–2,42 мг S/л со средним значением 0,51 мг S/л. Наибольшее значение (2,42 мг S/л) зафиксировано в пробе, отобранной за период 11.11–02.12. Коэффициент вариации значений высокий и составил 115,4 %. Содержание нитрат-ионов в 2019 г. находилось на уровне н. о.–1,47 мг N/л со средним значением 0,37 мг N/л. Коэффициент вариации значений составил 109,8 %. Наибольшие значения – 1,25 и 1,47 мг N/л – получены в пробах, отобранных 04.02–18.02 и 14.10–04.11 соответственно. Среднее содержание ионов аммония составило 0,38 мг N/л и варьировало в пределах от н. о. до 1,60 мг N/л. Коэффициент вариации значений составил 126,7 %. Наибольшие значения зафиксированы в пробах, отобранных в конце января – феврале (28.01–04.02, 04.02–18.02, 18.02–04.03) – 1,17–1,34 мг N/л и в период 10.05–13.05 (1,60 мг N/л).

В 2020 г. содержание сульфат-иона зафиксировано в 37 из 42 отобранных проб и в среднем составило 0,72 мг S/л. Наибольшие значения получены в недельных пробах, отобранных в апреле – мае 30.04–04.05 (1,97 мг S/л) и 19.05–25.05 (2,22 мг S/л), сентябре (4,99 мг S/л). Наибольшие значения получены при минимальных количествах выпавших осадков (47–60 мл). Наименьшие значения зафиксированы в трех пробах, отобранных в июле. Среднее содержание нитрат-иона в 2020 г. составило 0,67 мг S/л и колебалось в пределах от н. о. до 9,73 мг S/л. Среднее содержание нитрат-ионов составило 0,67 мг N/л и варьировало в широких пределах – от н. о. до 9,73 мг N/л. Наибольшее значение зафиксировано в пробе, отобранной 03.02–10.02. Остальные значения в течение года не превышали 1,52 мг N/л. Содержание ионов аммония находилось в диапазоне 0,07–12,52 мг N/л и в среднем составило 1,22 мг N/л. Наибольшее значение (12,52 мг N/л) зафиксировано в пробе, отобранной за период 05.10–12.10.

В 2021 г. содержание серы определено в 34 пробах и варьировало в пределах н. о.–4,41 мг S/л со средним значением 0,65 мг S/л. Коэффициент вариации значений высокий и составил 130,6 %. Содержание нитрат-ионов находилось на уровне 0,05–1,75 мг N/л со средним значением 0,42 мг N/л; коэффициент вариации значений высокий и составил 91,0 %. Среднее содержание ионов аммония составило 0,89 мг N/л (диапазон 0,10–5,24 мг N/л).

В 2022 г. содержание серы варьировало в пределах н. о.–2,27 мг S/л со средним значением 0,39 мг S/л. Наибольшие значения зафиксированы в пробах, отобранных в конце марта – начале апреля: 28.03–04.04 (2,27 мг S/л), мае: 09.05–16.05 (1,97 мг S/л) и конце октября: 24.10–31.10 (1,42 мг S/л). Минимальные значения зафиксированы в январе – феврале (в пробах, отобранных за периоды 03.01–10.01, 10.01–17.01, 07.02–14.02, 14.02–21.02), мае (16.05–23.05, 23.05–30.05), июле (в пробах, отобранных за периоды 06.07–12.07, 25.07–01.08) и сентябре – начале октября (недельные пробы за периоды 05.09–10.10 и 17.10–24.10).

Содержание нитрат-ионов в 2022 г. находилось в диапазоне н. о.–0,62 мг N/л со средним значением 0,24 мг N/л. Коэффициент вариации значений составил 53,1 %. Среднее содержание ионов аммония в 2022 г. составило 0,38 мг N/л и варьировало в пределах от н. о. до 1,48 мг N/л.

За период с 2018 по 2022 г. минерализация проб атмосферных осадков, отобранных на постоянной площадке, в 85 % проб не превышала 30 мг/л, при этом около 63 % проб имели значение минерализации менее 15 мг/л. Средняя минерализация атмосферных осадков за период наблюдений с 2018 по 2022 г. составила 18,6 мг/дм³ и варьировало от 0,6 до 170,7 мг/л. Коэффициент вариации – 122,3 %. Минимальное среднее годовое значение минерализации проанализированных проб (4,12 мг/дм³) зафиксировано в 2018 г., максимальное – (32,6 мг/дм³) в 2020 г. (см. табл. 1).

Значения удельной электропроводности варьировали в пределах 3,14–252 мкСм/см со средним значением 43,16 мкСм/см. Разброс значений составил 104,9 %. Минимальные показатели электропроводности чаще характерны для периодов выпадения наибольших количеств осадков за неделю.

В 2018–2022 гг. значение pH недельных проб атмосферных осадков изменялось в диапазоне 4,33–7,80 со средним значением 6,34; коэффициенты вариации значений были довольно низкие (5,9–10,0 %), что свидетельствует о достаточно однородном внутригодовом распределении содержания данного компонента. Среднегодовые значения pH изменялись незначительно (от 6,20 до 6,45) и превышали равновесную величину для атмосферных осадков (5,6).

Среднее содержание соединений серы за период составило 0,54 мг S/л, окисленного азота – 0,42 мг N/л, восстановленного азота – 0,69 мг N/л.

Для большинства ионов характерна высокая вариабельность значений (коэффициент вариации – 116,4–215,6 %). Наибольшей вариабельностью характеризуются окисленный азот (192,3 %), гидрокарбонаты (176,9 %), натрий (188,8 %) и калий (215,6 %); меньшие отклонения от среднего характерны для хлоридов (116,4 %), сульфатов (130,7 %), кальция (132,5 %) и магния (127,8 %) (см. табл. 1).

В динамике среднегодового взвешенного содержания фиксируются повышенные значения для всех трех закисляющих и эвтрофирующих соединений в 2020 г., а для серы – еще и в 2021 г. Эта закономерность сохраняется при пересчете месячных концентраций на средневзвешенные значения, а также при расчете выпадений.

Большинство зафиксированных максимальных и минимальных значений среднемесячного взвешенного содержания серы и азота в осадках совпадают по времени. Однако имеются и отличия: например, в марте 2022 г., когда зафиксировано наибольшее среднемесячное содержание серы, содержание окисленного и восстановленного азота фиксировалось на уровне ниже предела обнаружения метода.

В 2018 г. наибольшие значения концентраций всех трех рассматриваемых ионов наблюдались в марте – мае, в 2019 г. – в конце февраля – начале марта, в июне и в конце года (ноябре – декабре), в 2020 г. – в феврале – марте, июне и октябре, в 2021 г. – в марте – апреле и октябре – декабре, в 2022 г. – в апреле и октябре – декабре (рис. 1).

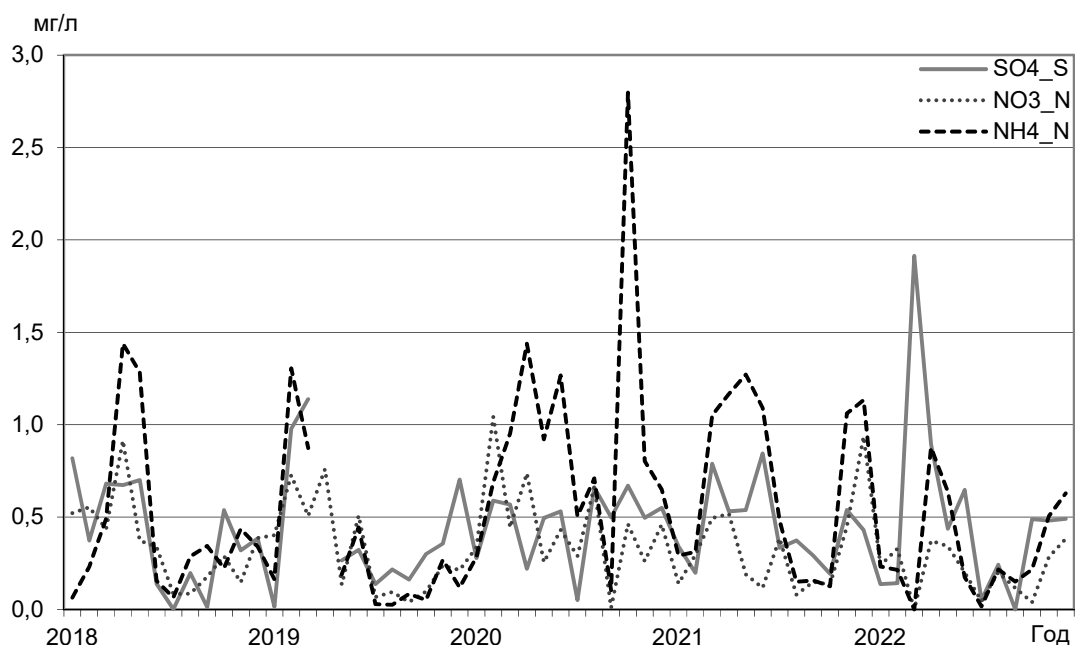


Рис. 1. Динамика среднемесячного взвешенного содержания серы и азота в атмосферных осадках в г. Минске, 2018–2022 гг.

Fig. 1. Dynamics of the monthly weighted average sulfur and nitrogen content in precipitation in Minsk, 2018–2022

Минимальные среднемесячные взвешенные концентрации всех трех компонентов в 2018 г. зафиксированы в июле, в 2019 и 2022 г. – в июле и сентябре. В 2020 г. минимальные значения окисленного и восстановленного азота приходились на сентябрь, серы – на июль. В 2021 г. минимальные значения окисленного и восстановленного азота зафиксированы в августе – октябре, серы – в октябре.

В 2018 г. наибольшие значения среднемесячного взвешенного содержания серы приходились на январь и май, в 2019 г. – на февраль и март, в 2020 г. фиксировались в августе и октябре, в 2021 г. – в марте и июне, в 2022 г. приходились на март – апрель и октябрь – декабрь.

Наибольшие значения среднемесячного взвешенного содержания окисленного азота в 2018, 2019 и 2020 г. фиксировались в феврале и апреле, в 2021 г. – в марте – апреле и ноябре – декабре, в 2022 г. – в апреле – мае и ноябре – декабре.

Наибольшие значения среднемесячного взвешенного содержания окисленного азота в 2018 г. зафиксированы в апреле – мае, в 2019 г. – в феврале, в 2020 г. – апреле, июне и октябре, в 2021 г. – в марте, апреле, мае, июне и ноябре – декабре, в 2022 г. в апреле – мае и ноябре – декабре.

Ряды месячных выпадений серы и азота в целом близки рядам средних месячных взвешенных концентраций (рис. 2). Однако некоторые пиковые значения концентраций не сопровождаются пиковыми значениями выпадений и наоборот.

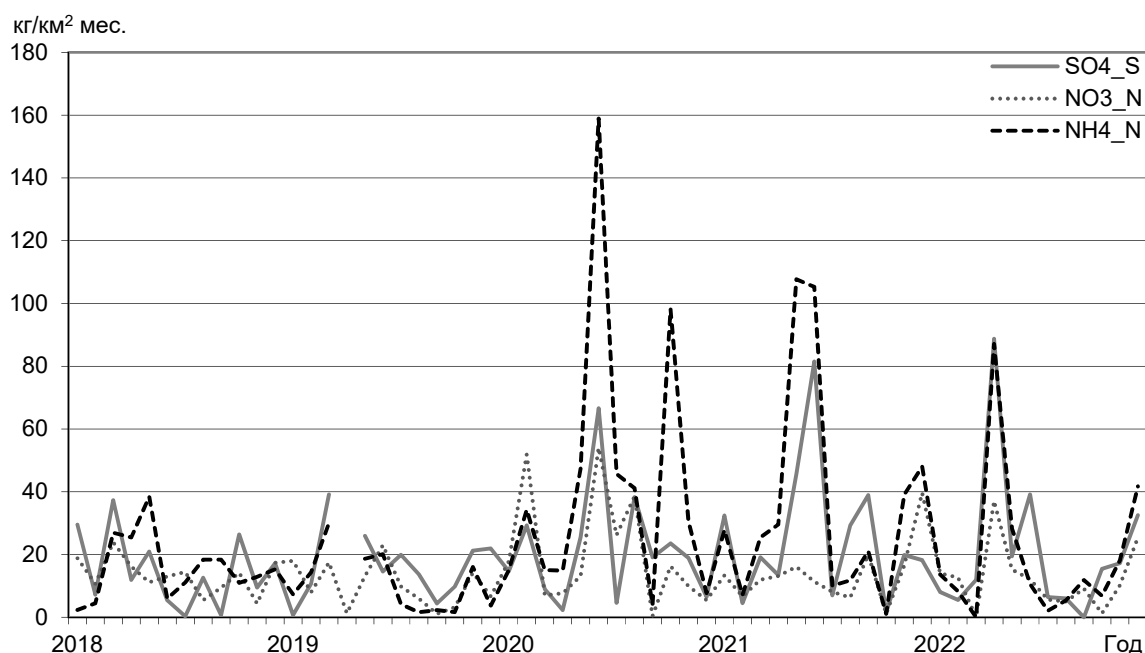


Рис. 2. Динамика месячного выпадения серы и азота с атмосферными осадками в г. Минске, 2018–2022 гг.

Fig. 2. Dynamics of monthly deposition of sulfur and nitrogen with precipitation in Minsk, 2018–2022

Среднегодовые взвешенные содержания серы в атмосферных осадках за исследуемый период варьировали от 0,29 мг S/л (2018 г.) до 0,47 мг S/л (2021 г.), окисленного азота – от 0,21 мг N/л (2019 г.) до 0,43 мг N/л (2020 г.), восстановленного азота – от 0,20 мг N/л (2019 г.) до 0,89 мг N/л (2020 г.) (табл. 3). Годовые выпадения серы были максимальными также в 2021 г., окисленного и восстановленного азота – в 2020 г.

Таблица 3. Динамика среднегодового взвешенного содержания серы и азота в атмосферных осадках годового выпадения серы и азота в г. Минске, 2018–2022 г., мг/л

Table 3. Dynamics of the annual weighted average sulfur and nitrogen content in precipitation and annual deposition of sulfur and nitrogen in Minsk, 2018–2022, mg/l

Год	Содержание в осадках			Годовые выпадения, кг/км ²		
	SO ₄ ²⁻ , мг S/л	NO ₃ ⁻ , мг N/л	NH ₄ ⁺ , мг N/л	Серa	Азот	
					окисленный	восстановленный
2018	0,29	0,26	0,31	178,9	158,9	190,5
2019	0,31	0,21	0,20	182,1	121,7	119,8
2020	0,45	0,43	0,89	258,2	248,2	512,8
2021	0,47	0,25	0,65	311,5	164,2	433,9
2022	0,37	0,22	0,35	250,4	147,6	233,9

Сравнение с данными наблюдений на сети станций ЕМЕП. Выполнено сопоставление данных наблюдения химического состава осадков в г. Минске с динамикой содержания серы и азота в осадках на станциях Программы ЕМЕП; основное внимание уделено станциям, расположенным в странах – соседях Беларуси: Латвии – станция «Рукава» (LV0010R), Литве – станция «Прейла» (LT0015R) и Польше – станция «Дьябла Гора» (PL0005R). Использованы данные электронной базы данных EBAS [11, 12].

В 2018 г. среднегодовое содержание серы и азота в атмосферных осадках в г. Минске в целом близко содержанию в осадках на близлежащих станциях ЕМЕП (станции «Рукава» и «Прейла»), несколько ниже среднего по станциям ЕМЕП.

В 2019 г. среднегодовое содержание серы и азота было ниже, чем на станции «Рукава», но выше, чем на станции «Прейла», и близко средним значениям по станциям ЕМЕП в Европе.

В 2020 г. замеренное среднегодовое содержание серы и окисленного азота в г. Минске было близко значениям на станции «Рукава», существенно выше, чем на станции «Прейла» и среднего значения по Европе. Среднее содержание аммонийного азота существенно выше – самое высокое за период с 2003 г., нитратного азота – за период с 2007 г. Велико и медианное значение концентраций аммонийного азота. Вероятно влияние локальных источников и сухого осаждения, так как аммиак имеет наименьшую дальность переноса.

В 2021 г. ситуация являлась разнородной: содержание серы в осадках было существенно выше среднего по Европе, а также значений, зафиксированных на станциях «Рукава» и «Прейла», окисленного азота – близко значениям, замеренным на станции «Прейла» и выше среднего значения по Европе и на станции «Рукава», восстановленного азота – существенно выше, чем на ближайших станциях и среднего значения по Европе. Медианное содержание восстановленного азота тоже высокое. Таким образом, на величину среднего влияют не только пиковые значения.

В 2022 г. среднегодовые концентрации серы и азота в г. Минске не выходили за пределы диапазона среднегодовых концентраций, замеренных на станциях «Рукава» и «Дьябла Гора».

Динамика среднегодового взвешенного содержания серы и азота в атмосферных осадках по данным измерений на экспериментальной площадке и на станциях «Рукава» и «Дьябла Гора» за период с 2018 по 2022 г. показана на рис. 3. Наиболее заметное отклонение среднегодового содержания в атмосферных осадках в г. Минске от диапазона колебаний концентраций в рассматриваемый период на указанных станциях ЕМЕП характерно для восстановленного азота.

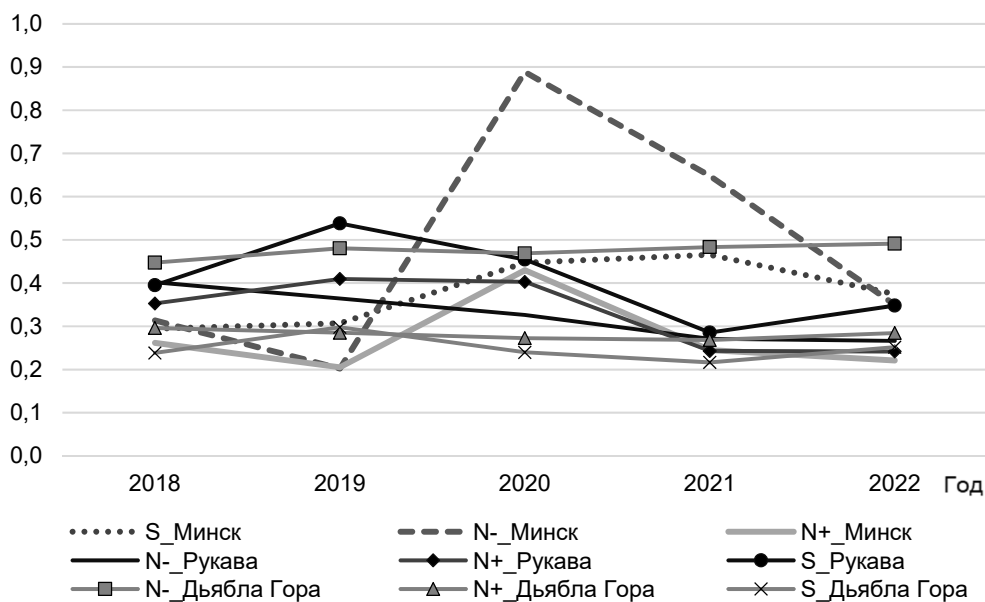


Рис. 3. Динамика среднегодового взвешенного содержания серы и азота в атмосферных осадках в г. Минске и на станциях ЕМЕП «Рукава» и «Дьябла Гора», 2018–2022 гг.

Fig. 3. Dynamics of the annual weighted average sulfur and nitrogen content in precipitation in Minsk and at the EMEP stations "Rukava" and "Diabla Gora", 2018–2022

Сравнение величин выпадений по данным измерений на экспериментальной площадке с расчетными значениями выпадений, полученными по Программе ЕМЕП. Выполнено сравнение величин атмосферных выпадений серы и азота по данным наблюдения за химическим составом атмосферных осадков в г. Минске с расчетными величинами сухих и влажных выпадений серы и азота, полученными в рамках Программы ЕМЕП [13]. Использованы результаты моделирования выпадений по сетке ЕМЕП $0,1^\circ \times 0,1^\circ$. Динамика месячного валового выпадения серы и азота в г. Минске по данным модельных расчетов показана на рис. 4, динамика годового валового выпадения – в табл. 4.

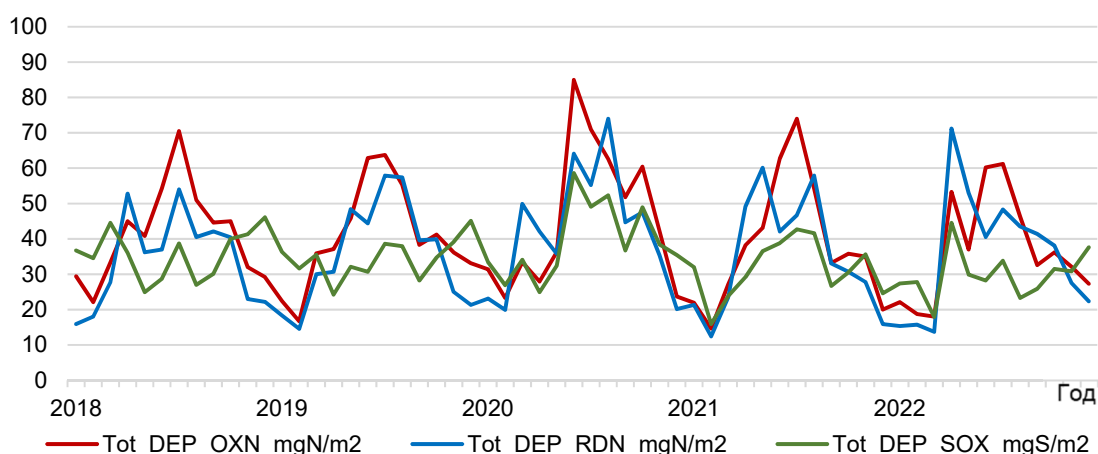


Рис. 4. Динамика месячного выпадения серы (mg S/m^2) и азота (mg N/m^2) в г. Минске по данным модельных расчетов ЕМЕП, 2018–2022 гг. [13]

Fig. 4. Dynamics of monthly deposition of sulfur (mg S/m^2) and nitrogen (mg N/m^2) in Minsk according to EMEP model calculations, 2018–2022 [13]

Таблица 4. Динамика годового выпадения серы и азота в г. Минске по данным модельных расчетов ЕМЕП, 2018–2022 гг. [13]

Table 4. Dynamics of annual deposition of sulfur and nitrogen in Minsk according to EMEP model calculations, 2018–2022 [13]

Год	Сера, кг S /км ²			Окисленный азот, кг N/км ²			Восстановленный азот, кг N/км ²		
	Выпадения								
	влажные	сухие	валовые	влажные	сухие	валовые	влажные	сухие	валовые
2018	188,3	240,2	428,5	195,8	301,4	497,2	281,1	128,7	409,8
2019	168,2	245,8	414,0	178,7	309,9	488,6	290,8	136,6	427,4
2020	221,1	250,0	471,1	237,4	311,5	548,9	371,3	140,4	511,7
2021	152,3	225,6	377,9	177,0	282,8	459,8	291,6	129,0	420,6
2022	154,4	204,2	358,6	183,8	261,2	445,0	301,6	128,9	430,5

Модельные месячные величины выпадений имеют выраженные пики в летний период.

Модельные величины годовых влажных выпадений в целом близки расчетным по данным мониторинга на экспериментальной площадке (см. табл. 4). Максимальные уровни выпадений как серы, так и азота, согласно моделированию по Программе ЕМЕП, характерны для 2020 г.; для этого же года характерны пиковые уровни выпадений и по данным измерений на экспериментальной площадке.

Для 2020 г. характерна также максимальная доля влажных выпадений в суммарных (46 % для серы, 44 % для окисленного азота и 70 % для восстановленного азота).

Сравнение полученных результатов с результатами мониторинга серы и азота в атмосферных осадках на Европейской части Российской Федерации (ЕТР – Европейская территория России). Выполнено сопоставление данных наблюдения средневзвешенных концентраций серы и азота в г. Минске с данными об их содержании в осадках двух ближайших физико-географических регионов России [14, 15].

Выявлено, что среднее взвешенное годовое содержание серы в атмосферных осадках в регионах России в 2018–2022 гг. существенно выше, чем в г. Минске: в Центральной ЕТР годовые концентрации серы составили 3,2–4,4 мг/л, в Северной и Северо-западной ЕТР – 1,52–2,0, в г. Минске – 0,9–1,41 мг/л; наиболее схожие значения концентраций получены в 2020 г. (табл. 5).

Таблица 5. Значения среднегодовые взвешенных концентраций серы и азота в осадках на территории Европейской части Российской Федерации (ЕТР), 2018–2022 гг., мг/л [14, 15]

Table 5. Average annual weighted sulfur and nitrogen concentrations in precipitation on the territory of the European part of the Russian Federation (ЕТР), 2018–2022, mg/l [14, 15]

Показатель	Регион	2018 г.	2019 г.	2020 г.	2021 г.	2022 г.
SO ₄	Север и Северо-запад ЕТР	2,0	1,8	1,6	1,67	1,52
	Центр ЕТР	3,3	4,4	3,2	3,61	3,27
	г. Минск (данное исследование)	0,9	0,9	1,4	1,41	1,11
NO ₃	Север и Северо-запад ЕТР	1,3	1,1	1,2	1,20	1,34
	Центр ЕТР	2,1	2,4	2,3	2,66	2,05
	г. Минск (данное исследование)	1,2	0,9	1,9	1,11	0,97
NH ₄	Север и Северо-запад ЕТР	0,4	0,3	0,3	0,31	0,38
	Центр ЕТР	0,6	0,7	0,7	0,58	0,59
	г. Минск (данное исследование)	0,4	0,26	1,1	0,84	0,45

Среднегодовые взвешенные содержания нитратного азота в атмосферных осадках за исследуемый период варьировали от 1,2 мг/л (2020 и 2021 г.) до 1,34 мг/л (2021 г.) для Севера и Северо-запада ЕТР и от 2,05 мг/л (2022 г.) до 2,66 мг/л (2021 г.) для Центра ЕТР.

Годовые взвешенные концентрации аммонийного азота в Северной и Северо-западной ЕТР варьировали от 0,3 мг/л (2019 и 2020 г.) до 0,4 мг/л (2018 г.), в Центральной ЕТР – от 0,58 мг/л (2021 г.) до 0,7 мг/л (2019 и 2020 г.). Наиболее близкие годовые средневзвешенные концентрации аммонийного и нитратного азота в регионах России и в г. Минске – в 2018 и 2019 г.

Сравнение с данными станций фоновое мониторинга ЕТР. Проведенный анализ показал сходимость рядов среднегодового взвешенного содержания серы в осадках в г. Минске и на станциях фоновое мониторинга ЕТР [16]. В г. Минске и на станции Воронежского биосферного заповедника (БЗ) отмечается близкое годовое средневзвешенное содержание серы за весь анализируемый период, за исключением 2021 г., в г. Минске и на станциях Приокско-Террасного БЗ и Кавказского БЗ – за анализируемый период, за исключением 2020 г. (рис. 5, а).

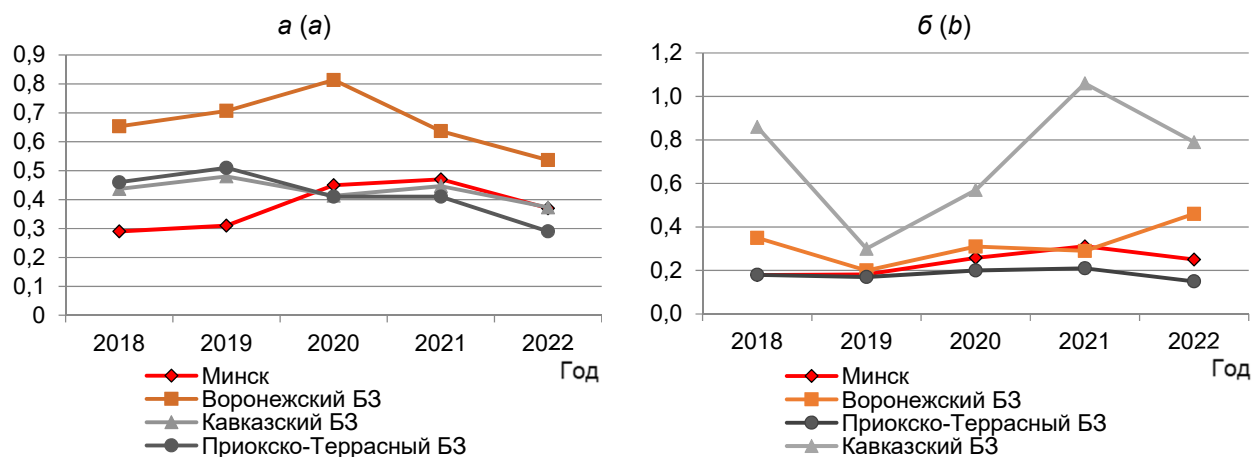


Рис. 5. Динамика среднегодового взвешенного содержания серы (мг S/л) (а) и годовых выпадений серы (т S/км²) (б) в г. Минске и на станциях фоновое мониторинга Европейской территории России (ЕТР)

Fig. 5. Dynamics of average annual weighted sulfur concentrations (mg S/l) (a) and annual sulfur deposition (t S/km²) (b) in Minsk and at background monitoring stations of the European territory of the Russian Federation (ЕТР)

Ряд выпадения серы в Минске имеет наибольшую сходимость с рядом годовых выпадений серы в Приокско-Тerrasном БЗ (рис. 5, б).

Анализ динамики годового средневзвешенного содержания окисленного и восстановленного азота в г. Минске и на станциях фонового мониторинга ЕТР не выявил сходства. Сходимость рядов годовых взвешенных концентраций окисленного азота в г. Минске и Приокско-Тerrasном БЗ получена в 2018–2019 и 2021–2022 гг., в г. Минске и Воронежском БЗ, Кавказском БЗ – в 2021–2022 гг. Сходимость рядов годовых взвешенных концентраций восстановленного азота в г. Минске и Воронежском БЗ зафиксирована в 2018–2019 гг., в г. Минске и Приокско-Тerrasном БЗ – в 2021–2022 гг.

Анализ динамики годовых выпадений окисленного и восстановленного азота в г. Минске и на станциях фонового мониторинга ЕТР также не выявил сходства. В отдельные годы получена сходимость рядов годовых взвешенных концентраций окисленного и восстановленного азота в г. Минске и Воронежском БЗ, Кавказском БЗ (2018–2019 гг.), а также в г. Минске, Приокско-Тerrasном БЗ и Кавказском БЗ (2021–2022 гг.).

Сравнение с данными НСМОС. В Республике Беларусь по данным на 2022 г. наблюдения за химическим составом атмосферных осадков проводились на 22 пунктах наблюдений Национальной системы мониторинга окружающей среды (НСМОС) [17]. В г. Минске в 2018–2022 гг. общая минерализация проб атмосферных осадков составила 9,5–12,0 мг/л, из которых на долю сульфатов приходилось 6–10 %. В соответствии с имеющимися данными, в период с 2020 по 2022 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.

Заключение. Выполненное исследование позволило охарактеризовать особенности химического состава атмосферных осадков на территории г. Минска за период с 2018 по 2022 г. на основе анализа результатов мониторинга химического состава атмосферных осадков на экспериментальной площадке Института природопользования НАН Беларуси.

Сопоставление данных наблюдений химического состава осадков в г. Минске с динамикой содержания серы и азота в осадках на станциях Программы ЕМЕП показало, что в целом диапазон средних месячных и 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 восстановленного азота в 2020 г.

Сравнение величин атмосферных выпадений серы и азота по данным наблюдения за химическим составом атмосферных осадков в г. Минске с расчетными величинами сухих и влажных выпадений серы и азота, полученными в рамках Программы ЕМЕП, показало, что модельные величины годовых влажных выпадений в целом близки расчетным по данным мониторинга на экспериментальной площадке. Максимальные уровни выпадений как серы, так и азота, согласно моделированию по Программе ЕМЕП, характерны для 2020 г.; для этого же года свойственны пиковые уровни выпадений и по данным измерений на экспериментальной площадке.

Выявлена сходимость рядов годового средневзвешенного содержания серы в осадках в г. Минске и на станциях фонового мониторинга ЕТР.

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 годы (№ 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

- Mehr, M. R. Influence of natural and urban emissions on rainwater chemistry at a southwestern Iran coastal site / M. R. Mehr, B. Keshvarsari, A. Sorooshian // *Sci. Total Environ.* – 2019. – Vol. 668. – P. 1213–1221.
- Chemical Composition Characteristics and Source Contributions of Precipitation in Typical Cities on the North Slope of Tianshan Mountain in Xinjiang during 2010–2019 / Y. Zhong [et al.] // *Atmosphere*. – 2022. – Vol. 13 (5). – P. 646. doi:10.3390/atmos13050646
- A global assessment of precipitation chemistry and deposition of sulfur, nitrogen, sea salt, base cations, organic acids, acidity and pH, and phosphorus / R. Vet [et al.] // *Atmos. Environ.* – 2014. – Vol. 93. – P. 3–100. doi:10.1016/j.atmosenv.2013.10.060
- Assessing the neutralisation, wet deposition and source contributions of the precipitation chemistry over Europe during 2000–2017 / A. Keresztesi [et al.] // *Environmental Sciences Europe*. – 2019. – Vol. 31 (1). – Art. 50. doi:10.1186/s12302-019-0234-9
- Еремина, И. Д. Химический состав атмосферных осадков в Москве и тенденции его многолетних изменений / И. Д. Еремина // *Вестник Московского ун-та. Сер. 5, География*. – 2019. – № 3. – С. 3–10.
- 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 // *Atmos Environ.* – 2005. – Vol. 39. – P. 999–1008. doi:10.1016/j.atmosenv.2004.10.036
- 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.
- 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
- Manual for the GAW precipitation chemistry programme [Электронный ресурс] // QA/SAC - Americas. – Режим доступа: https://s3.us-east-2.amazonaws.com/envirovantage/GAW-PrecipChemManualNo160_Ammended15Oct2015.pdf. – Дата доступа: 24.06.2021.
- EMEP Manual for Sampling and Chemical Analysis. 2001. EMEP/CCC Report 1/95, Revision 2001, Norwegian Institute for Air Research, Kjeller, Lillestrom, Norway.
- EMEP/CCC Reports 2020–2023 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://projects.nilu.no/ccc/reports.html>. – Дата доступа: 04.02.2024.
- EBAS Home, 2024 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ebas.nilu.no/>. – Дата доступа: 12.03.2024
- EMEP MSC-W modelled air concentrations and depositions, 2024 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://emep.int/mscw/mscw_moddata.html. – Дата доступа: 18.03.2024.
- Ежегодник Состояние загрязнения атмосферы в городах на территории России за 2018–2022 гг. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://voeikovmgo.ru/index.php/deyatelnost/publikacii/40-perechen-materialov-izdannyykh-ggo>. – Дата доступа: 24.01.2024.
- Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2018–2022 гг. [Электронный ресурс] / под ред. проф. Г. М. Черногаевой ; Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (РОСГИДРОМЕТ). – Режим доступа: <http://www.igce.ru/performance/publishing/reports/>. – Дата доступа: 24.01.2024.
- Обзор фонового состояния окружающей природной среды на территории стран СНГ за 2018–2022 гг. [Электронный ресурс] / под ред. проф. Г. М. Черногаевой. – Режим доступа: <http://www.igce.ru/performance/publishing/reports/>. – Дата доступа: 24.01.2024.
- Национальная система мониторинга окружающей среды [Электронный ресурс] // Мониторинг атмосферного воздуха. Результаты наблюдений за 2018–2022 гг. – Режим доступа: <https://www.nsmos.by/publikacii>. – Дата доступа: 24.01.2024.

References

- Mehr M. R., Keshvarsari B., Sorooshian A. Influence of natural and urban emissions on rainwater chemistry at a southwestern Iran coastal site. *Sci. Total Environ.*, 2019, vol. 668, pp. 1213–1221.
- Zhong Y., Li X., Fan Z., Ayitken M., Li S., Liu X. 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 (5), p. 646. doi:10.3390/atmos13050646
- Vet R., Artz R. S., Carou S., Shaw M., Ro Ch.-Un, Aas W., Baker A., Van C. Bowersox, Dentener F., Galy-Lacaux C., Hou A., Pienaar J. J., Gillett R., Forti M. C., Gromov S., Hara H., Khodzher T., Mahowald N. M., Nickovic S., Rao P. S. P., Reid N. W. 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.

4. Keresztesi Á., Birsan M. V., Nita I. A., Bodor Z., Szép R. Z. Assessing the neutralisation, wet deposition and source contributions of the precipitation chemistry over Europe during 2000–2017. *Environ Sci Eur.*, 2019, vol. 31 (1), art. 50. doi:10.1186/s12302-019-0234-9
5. Eremina I. D. *Himicheskij sostav atmosferynyh osadkov v Moskve i tendencii ego mnogoletnih izmenenij* [Chemical composition of atmospheric precipitation in Moscow and the trends of its long-term changes]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5, Geografiya = Bulletin of the Moscow University. Series 5, Geography*, 2019, no. 3, pp. 3–10. (in Russian)
6. Mouli P. C., Mohan S. V., Reddy S. J. Rainwater chemistry at a regional representative urban site: influence of terrestrial sources on ionic composition. *Atmos. Environ.*, 2005, vol. 39, pp. 999–1008. doi:10.1016/j.atmosenv.2004.10.036
7. Fagerli H., Aas W. Trends of nitrogen in air and precipitation: Model results and observations at EMEP sites in Europe 1980–2003. *Environ. Pollut.*, 2008, vol. 154, pp. 448–461. doi:10.1016/j.envpol.2008.01.024
8. Kakareka S. V., Kokosh Yu. G., Kudrevich M. A. *Trendy sodержaniya zakislyayushchih i evtrofiruyushchih soedinenij v atmosferynyh osadkah na urbanizirovan-noj territorii* [Trends in the content of acidifying and eutrophying compounds in atmospheric precipitation in an urbanized area]. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady 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)
9. Manual for the GAW precipitation chemistry programme. QA/SAC – Americas. Available at: https://s3.us-east-2.amazonaws.com/envirovantage/GAW-PrecipChemManualNo160_Ammended15Oct2015.pdf (accessed June 24, 2021).
10. EMEP Manual for Sampling and Chemical Analysis. 2001. EMEP/CCC Report 1/95, Revision 2001, Norwegian Institute for Air Research, Kjeller, Lillestrom, Norway.
11. EMEP/CCC Reports 2020–2023. Available at: <https://projects.nilu.no/ccc/reports.html> (accessed March 4, 2021).
12. EBAS Home, 2024. Available at: <https://ebas.nilu.no/> (accessed March 12, 2024).
13. EMEP MSC-W modelled air concentrations and depositions, 2024. Available at: https://emep.int/mscw/mscw_moddata.html (accessed March 18, 2024).
14. *Yezhegodnik Sostoyaniye zagryazneniya atmosfery v gorodakh na territorii Rossii za 2018–2022 g.* [Annual State of atmospheric pollution in cities on the territory of Russia for 2018–2022]. Available at: <http://voeikovmgo.ru/index.php/deyatelnost/publikacii/40-perechen-materialov-izdannyykh-ggo> (accessed March 20, 2024). (in Russian)
15. *Obzor sostoyaniya i zagryazneniya okruzhayushchey sredy v Rossiyskoy Federatsii za 2018–2022 gg.* [Review of the state and pollution of the environment in the Russian Federation for 2018–2022]. Ed. by Prof. G. M. Chernogayeva. *Federal'naya sluzhba po gidrometeorologii i monitoringu okruzhayushchey sredy (ROSGIDROMET)* [Federal'naya sluzhba po gidrometeorologii i monitoringu okruzhayushchey sredy (ROSGIDROMET)]. Available at: <http://www.igce.ru/performance/publishing/reports/> (accessed March 18, 2024). (in Russian)
16. *Obzor fonovogo sostoyaniya okruzhayushchey prirodnoy sredy na territorii stran SNG za 2018–2022 g.* [Review of the background state of the natural environment in the CIS countries for 2018–2022]. Ed. by Prof. G. M. Chernogayeva. Available at: <http://www.igce.ru/performance/publishing/reports/> (accessed March 18, 2024). (in Russian)
17. *Natsional'naya sistema monitoringa okruzhayushchey sredy* [National system of environmental monitoring]. *Monitoring atmosfernogo vozdukh. Rezul'taty nablyudeniy za 2018–2022 gg.* [National system of environmental monitoring. Monitoring of atmospheric air. Observation results for 2018–2022]. Available at: <https://www.nsmos.by/content/173.html> (accessed January 24, 2024). (in Russian)

Информация об авторах

Какарека Сергей Витальевич – доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией трансграничного загрязнения, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: sk001@yandex.ru

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

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

Information about the authors

Sergey V. Kakareka – D. Sc. (Technical), Professor, Head of Lab of Transboundary Pollution, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: sk001@yandex.ru

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

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