

**НАУКИ О ЗЕМЛЕ**  
**EARTH SCIENCES**УДК 550.4:504.5(476)  
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2021-65-6-724-733>Поступило в редакцию 07.09.2021  
Received 07.09.2021**С. В. Какарека, Ю. Г. Кокош, М. А. Кудревич***Институт природопользования Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь***ТРЕНДЫ СОДЕРЖАНИЯ ЗАКИСЛЯЮЩИХ И ЭВТРОФИРУЮЩИХ СОЕДИНЕНИЙ  
В АТМОСФЕРНЫХ ОСАДКАХ НА УРБАНИЗИРОВАННОЙ ТЕРРИТОРИИ***(Представлено академиком В. Ф. Логиновым)*

**Аннотация.** Охарактеризованы тенденции изменения уровней содержания серы и азота в атмосферных осадках на территории Минска за 18-летний период на основе анализа результатов мониторинга химического состава атмосферных осадков на экспериментальной площадке. Выявлен нисходящий тренд содержания серы и азота, сочетающийся с восходящим трендом величины рН осадков. Среднее сокращение (тренд) за 2002–2019 гг. содержания серы в атмосферных осадках составило 0,019 мг/дм<sup>3</sup>/год, окисленного азота – 0,008 мг/дм<sup>3</sup>, восстановленного азота – 0,019 мг/дм<sup>3</sup>. Изменение содержания серы и азота в осадках привело к сокращению выпадения серы за 18-летний период в среднем на 31,3 кг/км<sup>2</sup>/год, окисленного азота – на 15,4 кг/км<sup>2</sup>/год, восстановленного азота – на 25,6 кг/км<sup>2</sup>/год. Показано, что потенциал закисления природной среды снижался с 2005 по 2012 г. параллельно снижению выпадений серы и азота; в последующий период тренд потенциала закисления в основном следует тренду выпадения основных катионов. Выявлено, что средние за период с 2002 по 2017 г. темпы сокращения содержания окисленной серы и окисленного азота в атмосферных осадках в Минске сопоставимы с темпами сокращения этих соединений на станциях Программы ЕМЕП в Европе, и превышают – для восстановленного азота.

**Ключевые слова:** атмосферные осадки, атмосферные выпадения, азот, сера, закисление, эвтрофирование

**Для цитирования.** Какарека, С. В. Тренды содержания закисляющих и эвтрофирующих соединений в атмосферных осадках на урбанизированной территории / С. В. Какарека, Ю. Г. Кокош, М. А. Кудревич // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2021. – Т. 65, № 6. – С. 724–733. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2021-65-6-724-733>

**Sergey V. Kakareka, Yuliya G. Kokosh, Mariya A. Kudrevich***Institute for Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus***TRENDS IN THE CONTENT OF ACIDIFYING AND EUTROPHYING COMPOUNDS  
IN ATMOSPHERIC PRECIPITATION IN AN URBANIZED AREA***(Communicated by Academician Vladimir F. Loginov)*

**Abstract.** The trends in changing the content of sulfur and nitrogen in atmospheric precipitation in the territory of Minsk over an 18-year period are characterized on the basis of the analysis of the monitoring results of the chemical composition of atmospheric precipitation at the experimental site. A downtrend in the sulfur and nitrogen content combined with an up-trend in the precipitation acidity was identified. An average decrease (trend) in the content of sulfur in atmospheric precipitation for 2002–2019 was 0.019 mg S/dm<sup>3</sup>/year, of oxidized nitrogen – 0.008 mg/dm<sup>3</sup>, of reduced nitrogen – 0.019 mg/dm<sup>3</sup>. Over an 18-year period, the changes in the content of sulfur and nitrogen in atmospheric precipitation decreased the deposition of sulfur on average by 31.3 kg/km<sup>2</sup>/year, of oxidized nitrogen – by 15.4 kg/km<sup>2</sup>/year, of reduced nitrogen – by 25.6 kg/km<sup>2</sup>/year. It is shown that for the period from 2005 to 2012, the acidification potential of the natural environment decreased parallel to the reduction of the sulfur and nitrogen deposition; in the subsequent period, the trend of the acidification potential basically follows the trend of the precipitation of the main cations. It is revealed that the rates of average reduction in the content of oxidized sulfur and oxidized nitrogen in atmospheric precipitation in Minsk for the period from 2002 to 2017 are comparable to the rates of reduction of these compounds at the stations of the EMEP Program in Europe, and exceed those for reduced nitrogen.

**Keywords:** atmospheric precipitation, atmospheric deposition, acidity, sulfur, nitrogen, acidification, eutrophication

**For citation.** Kakareka S. V., Kokosh Yu. G., Kudrevich M. A. 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 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2021-65-6-724-733>

**Введение.** Химический состав осадков является интегральной характеристикой загрязнения приземного слоя атмосферы. Атмосферные осадки составляют основную часть атмосферных выпадений (нагрузок на окружающую среду), определяя состояние почвенного покрова, экосистем и, во многом, поверхностных вод; через эти компоненты они оказывают влияние на здоровье человека. Атмосферные осадки являются эффективным индикатором загрязнения атмосферного воздуха, позволяющим существенно повысить пространственную плотность информации о состоянии воздушной среды, полученную с помощью отбора проб воздуха на стационарных постах. Изучение химического состава атмосферных осадков позволяет получить важную информацию о химическом составе атмосферы, выявить источники и пути поступления загрязняющих веществ.

Изучением химического состава атмосферных осадков занимались многие ученые; это позволило установить, что выпадения химических элементов с атмосферными осадками неоднородно в пространстве и во времени. На уровни выпадений влияет множество факторов, таких как тип, интенсивность и распределение природных источников поступления химических веществ и соединений в атмосферу; природные условия; особенности атмосферной циркуляции и процессов переноса и выведения из атмосферы химических веществ; характер и интенсивность промышленной и сельскохозяйственной деятельности и транспортной активности. Данные литературных источников свидетельствуют о широком диапазоне содержания химических элементов в атмосферных осадках, выпадающих в той или другой местности. Установлено, что, определив химический состав дождевой воды в конкретном месте или регионе, можно оценить локальное и региональное распространение загрязняющих веществ с атмосферными потоками [1].

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), ВАРМоN/GAW, EANET, NADP [1–5]. В то же время основная часть наблюдений за осадками проводится на фоновых территориях, в связи с чем вопросы изменения химического состава осадков в городах остаются недостаточно изученными.

Данное сообщение посвящено анализу динамики содержания серы и азота – основных закисляющих и эвтрофирующих соединений в атмосферных осадках, а также тренду кислотности атмосферных осадков на урбанизированной территории на примере Минска за период с 2002 по 2019 г.

**Материалы и методы исследования.** С 1999 г. Институтом природопользования НАН Беларуси организована площадка наблюдения за химическим составом атмосферных осадков и снежного покрова. Постоянные исследования начали проводить начиная с 2002 г. Экспериментальная площадка располагается в черте города Минска на территории Института. При формировании программы наблюдений учитывались рекомендации Глобальной службы атмосферы (ГСА) [6] и Программы ЕМЕП [7].

Задачи наблюдений – изучение динамики компонентов химического состава атмосферных осадков и снежного покрова в городских условиях во взаимосвязи с метеоусловиями, оценка интенсивности атмосферных выпадений.

На площадке проводились наблюдения за количеством выпадающих осадков, изучалась динамика мощности снежного покрова, контролировался химический состав атмосферных осадков и снеговых вод, метеоусловия. Основным период, за который отбирались пробы осадков, в соответствии с рекомендациями Программы ЕМЕП – неделя.

Опробование атмосферных осадков проводилось при помощи осадкомера конструкции NILU. Для исключения значительного влияния испарения в период накопления пробы в теплое время года использовался летний вариант осадкоборника.

Экспериментальные результаты сопоставлены с результатами измерений на станциях Программы ЕМЕП в Европе, а также на станции СФМ «Березинский заповедник».

При проведении химических испытаний проб осадков использованы 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 проводился в соответствии с принятой в лаборатории процедурой внутреннего контроля качества и рекомендаций программ ГСА и ЕМЕП (на основе вычисления ионного баланса) [8], а также путем участия в лабораторных сличительных испытаниях, проводимых Центром обеспечения качества и научной деятельности ГСА.

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

Всего за период исследований с 2002 по 2019 г. на экспериментальной площадке во дворе Института природопользования НАН Беларуси отобрано и проанализировано 729 проб атмосферных осадков.

Данные результатов химического анализа проб атмосферных осадков и снежного покрова, а также наблюдений за метеоусловиями и состоянием снежного покрова были сформированы в базу данных. База данных создана в MS Access2007 и MS Excel2007.

На основании результатов химико-аналитических испытаний рассчитаны среднегодовые и среднемесячные концентрации и выпадения за период с 2002 по 2019 г., общее изменение содержания компонента и выпадений за указанный период (в %), а также средняя скорость изменения содержания (в мг/год). Рассчитан также потенциал закисления среды и его изменение.

**Результаты и их обсуждение.** *Тренды концентраций серы и азота.* Динамика среднегодовых концентраций серы и азота в атмосферных осадках на территории Минска за период с 2002 по 2019 г. показана на рис. 1.

Максимум содержания серы в осадках достигло в 2006–2007 гг., затем оно снижалось. Содержание окисленного азота снижалось до 2017 г., после чего отмечен рост. Среднегодовое содержание восстановленного азота за исследуемый период характеризуется значительными межгодовыми колебаниями с общим нисходящим трендом.

Тренды изменения химического состава атмосферных осадков (среднее за 2017–2019 по отношению к среднему за 2002–2004 гг.) приведены в табл. 1.

За период с 2002 по 2019 г. содержание окисленной серы в атмосферных осадках сократилось на 38,5 %, окисленного азота – на 36,1 %, восстановленного азота – на 49,6 %. Среднегодовые

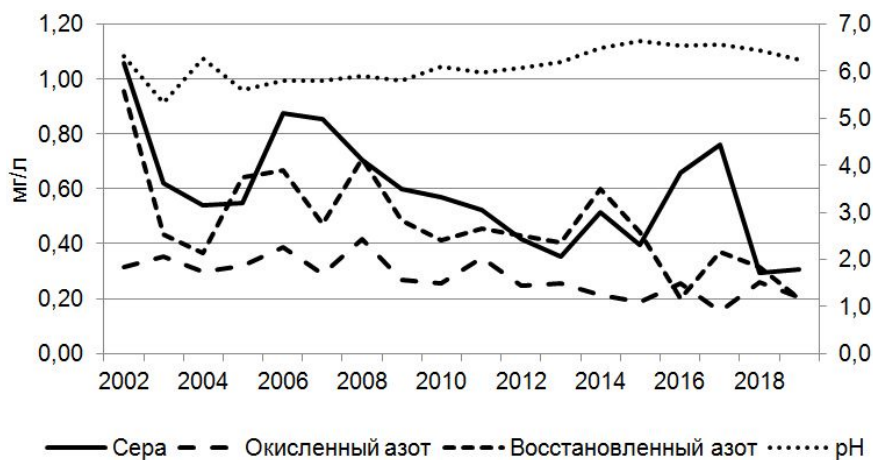


Рис. 1. Динамика среднегодового взвешенного содержания серы и азота в атмосферных осадках на территории Минска за период с 2002 по 2019 г.

Fig. 1. Dynamics of weighted mean concentrations of sulfur and nitrogen compounds in precipitation on the territory of Minsk from 2002 to 2019

Таблица 1. Тренды изменения химического состава атмосферных осадков на территории Минска за период с 2002 по 2019 г.

Table 1. Trends of concentrations of sulfur and nitrogen compounds in precipitation on the territory of Minsk from 2002 to 2019

Параметр Parameter	Среднее содержание, мг/л Average content, mg/l		Изменение за 2002–2019 гг., % Change for 2002–2019, %	Удельное изменение за 2002–2019 гг., мг/л/год Specific change for 2002–2019, mg/l/year
	2002–2004 гг.	2017–2019 гг.		
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> *	0,74	0,45	-38,48	-0,019
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> **	0,32	0,21	-36,06	-0,008
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> **	0,59	0,30	-49,57	-0,019
pH***	5,97	6,41	7,40	0,029

Примечание: \* – в пересчете на серу; \*\* – в пересчете на азот; \*\*\* – единиц рН.

Note: \* – in terms of sulfur; \*\* – in terms of nitrogen; \*\*\* – pH units.

темпы сокращения составили 0,019 мг серы, 0,008 мг окисленного и 0,019 мг восстановленного азота.

*Тренды рН атмосферных осадков.* Кислотность осадков (дождь, снег, дождь со снегом) обусловлена распределением вклада основных кислотообразующих ионов (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> и HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>). Согласно исследованиям [8; 9], значение рН облачной воды в равновесии с CO<sub>2</sub> в атмосфере в незагрязненной среде должно быть 5,6; это значение может уменьшаться из-за удаления дождевой водой природных кислот из атмосферы, поэтому значения рН осадков в чистой атмосфере могут варьировать от 5 до 5,6.

Динамика содержания рН в атмосферных осадках на постоянной площадке с 2002 по 2019 г. показана на рис. 1. За период наблюдений значение рН недельных проб атмосферных осадков на территории Минска колебалось в диапазоне 4,33–8,64; среднемесячное значение превышало равновесную величину для атмосферных осадков (5,6) 175 месяцев из 192.

Среднее значение рН увеличилось с 5,97 в 2002–2004 до 6,41 в 2017–2019 гг.; темп изменения составил 0,029 единиц рН в год. С 2005 по 2015–2017 гг. среднегодовое значение рН осадков возрастало. В 2018–2019 гг. оно снижалось вплоть до последнего времени.

*Тренды выпадений серы и азота.* Исходя из выполненных определений содержания серы и азота в атмосферных осадках на территории Минска рассчитаны месячные и годовые атмосферные

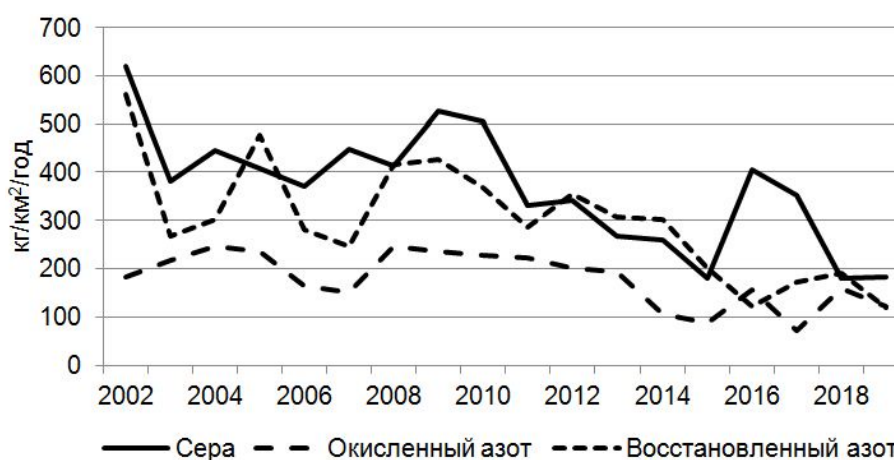


Рис. 2. Динамика годовых выпадений окисленной серы, окисленного и восстановленного азота на территории Минска с 2002 по 2019 г.

Fig. 2. Trends of annual deposition of oxidized sulfur, oxidized and reduced nitrogen with atmospheric precipitates on the territory of Minsk from 2002 to 2019

выпадения окисленной серы, окисленного и восстановленного азота. Многолетняя динамика среднегодовых уровней выпадений приведена на рис. 2.

За период с 2002 по 2019 г. выпадения серы в среднем сокращались на 31,3 кг/км<sup>2</sup>/год, окисленного азота – на 15,4 кг/км<sup>2</sup>/год, восстановленного азота – на 25,6 кг/км<sup>2</sup>/год (табл. 2).

Т а б л и ц а 2. Тренды годовых выпадений окисленной серы, окисленного и восстановленного азота на территории Минска с 2002 по 2019 г.

Table 2. Trends of annual deposition of oxidized sulfur, oxidized and reduced nitrogen in the territory of Minsk from 2002 to 2019

Параметр Parameter	Окисленная сера Oxidized sulfur	Окисленный азот Oxidized nitrogen	Восстановленный азот Reduced nitrogen
Среднее 2002–2004, кг/км <sup>2</sup> /год	482,1	216,5	377,1
Среднее 2015–2017, кг/км <sup>2</sup> /год	238,0	117,0	160,7
Среднее 2017–2019, кг/км <sup>2</sup> /год	238,0	117,0	160,7
Изменение за период 2002–2019 гг., %	–110,5	–121,2	–115,2
Среднее изменение за период, кг/км <sup>2</sup> /год	–31,3	–15,4	–25,6

Например, в среднем по регионам Российской Федерации выпадения серы в 2019 г. изменялись в диапазоне от 300 до 850 кг/км<sup>2</sup>/год, азота нитратного – от 110 до 330 кг/км<sup>2</sup>/год и азота аммонийного – от 170 до 540 кг/км<sup>2</sup>/год [10].

*Тренды потенциала закисления природной среды.* Для оценки потенциального экологического эффекта атмосферных выпадений рассчитаны выпадения основных закисляющих соединений (серы и азота) и физиологически активных основных катионов (кальция, магния и калия) в эквивалентной форме (рис. 3). Разность поступления этих групп соединений характеризует потенциал закисления [11].

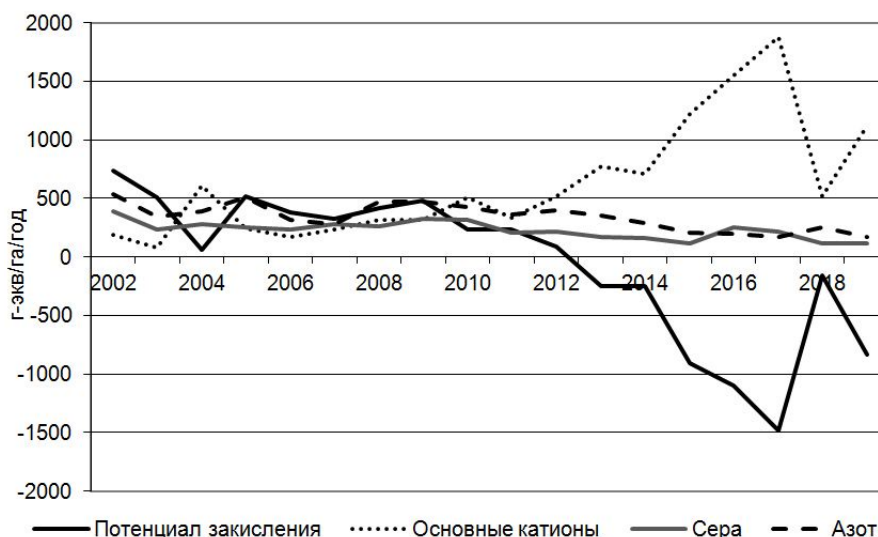


Рис. 3. Динамика потенциала закисления природной среды, выпадений серы, азота и основных катионов, обусловленных атмосферными осадками, на территории Минска с 2002 по 2019 г.

Fig. 3. Dynamics of acidification potential, deposition of sulfur, nitrogen and base cations due to atmospheric precipitates on the territory of Minsk from 2002 to 2019

Потенциал закисления плавно снижался с 2005 по 2012 г. параллельно снижению выпадений серы и азота. При этом происходит сокращение вклада серы в потенциал закисления и рост вклада азота. С 2013 г. отмечаются значительные колебания содержания основных катионов в осадках, в основном в сторону роста. Резкий рост содержания основных катионов произошел в 2015–

2017 гг., вследствие чего потенциал закисления после 2014 г. отрицательный. Сокращение поступления закисляющих соединений ведет к снижению потенциала закисления среды.

*Сезонная динамика содержания серы и азота в осадках.* Охарактеризованы сезонные различия в содержании серы и азота в осадках. Во внутригодовом ходе наиболее низкие значения концентраций ионов ( $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$  и  $\text{NH}_4^+$ ) в осадках приходятся на теплый период, что согласуется с минимальной минерализацией в этот период и максимальным количеством выпадающих осадков.

Так, минимальные значения содержания серы в осадках характерны для летнего периода, максимальные – для весны и осени. Минимальные содержания нитратов в осадках выявлены летом, максимальные – зимой. Минимальные содержания аммония в осадках характерны для позднего лета–осени, максимальные – поздней осени и весны. Анализ показал, что такие же особенности характерны и для Европейской части России [10].

Минимальное рН характерно для зимних осадков, максимальное – для осадков в апреле–июне и августе–сентябре.

Тренды содержания серы и азота в атмосферных осадках в Минске сопоставлены с трендами содержания диоксида серы и азота в атмосферном воздухе. Среднегодовые концентрации диоксида серы, осредненные по всем городам Беларуси, снизились с 3,7 мкг/м<sup>3</sup> в 2001 г. до 1,2 мкг/м<sup>3</sup> в 2012 г. За период с 2002 по 2012 г. градиент снижения составил 0,23 мкг/м<sup>3</sup> в год. Для фоновых территорий (СФМ «Березинский заповедник») при явном нисходящем тренде за весь период не выражен четкий тренд концентраций диоксида серы после 2002–2003 гг. Среднегодовое содержание диоксида серы согласно результатам наблюдений (ручной пробоотбор) на сети НСМОС сократилось с 0,8 мг/м<sup>3</sup> в 2002–2004 гг. до <0,02 мг/м<sup>3</sup> в 2017–2019 гг. [12–14].

Согласно результатам наблюдений на сети НСМОС [14], среднегодовое содержание диоксида азота в атмосферном воздухе Минска (по данным ручного пробоотбора) составило в 2002–2004 гг. 36,6 мг/м<sup>3</sup>, в 2017–2019 гг. – 28,8 мг/м<sup>3</sup>; сокращение составило 21,3%. Среднегодовое содержание аммиака в атмосферном воздухе Минска сократилось с 39,0 мг/м<sup>3</sup> в 2002–2004 гг. до 4,3 мг/м<sup>3</sup> в 2017–2019 гг.; сокращение составило 89 %.

Таким образом, тенденции изменений содержания серы и азота в атмосферных осадках в целом следуют тенденциям изменений содержания соединений серы и азота в атмосферном воздухе.

Среднегодовые значения величины рН атмосферных осадков на СФМ «Березинский заповедник» по данным НСМОС в 2002–2004 гг. изменялись в диапазоне 5,4–5,6. В 2019 г. среднее значение рН составило 6,1; таким образом, направление и темпы изменения рН атмосферных осадков близки установленным в Минске.

Выполнено также сопоставление данных наблюдения химического состава осадков в Минске с динамикой содержания серы и азота в осадках на станциях Программы ЕМЕП. Динамика среднегодового содержания серы и азота в атмосферных осадках в Европе по данным станций Программы ЕМЕП [15] за период с 2002 по 2017 г. показана на рис. 4.

За указанный период содержание серы в осадках сократилось на 43 %, окисленного азота – на 25,7 %, восстановленного азота – на 9 %. Темпы сокращения серы составили 0,019 мг/год, окисленного азота – 0,006 мг/год, восстановленного азота – 0,002 мг/год; рН росло в среднем со скоростью 0,021 единиц рН в год (табл. 3).

Согласно обобщению данных мониторинга атмосферных осадков по Программе ЕМЕП [16] за период 2002–2012 гг., на сети станций ЕМЕП сокращение содержания твердых сульфатов в атмосферном воздухе составило 39 %, сульфатов в осадках – 48 %, диоксида серы в воздухе – 48 %. Концентрация диоксида азота в атмосферном воздухе сократилась за этот же период на 17 %, окисленного азота в осадках – на 23 %, восстановленного азота – на 16 %.

Медианное среднегодовое сокращение содержания серы в осадках за период 2002–2012 гг. составило 0,019 мг/год, окисленного азота – 0,0083 мг/год, восстановленного азота – 0,0066 мг/год.

Осаждение соединений серы и азота считается серьезной экологической проблемой, особенно в Европе, где его последствия были впервые обнаружены. Выпадения подкисляющих и эвтрофирующих соединений в Европе значительно снизились за последние несколько десятилетий. Общее выпадение окисленной серы и окисленного азота снизилось на 45 и 22 % соответственно в период 1980–2009 гг. Эти сокращения в основном являются результатом снижения выбросов.

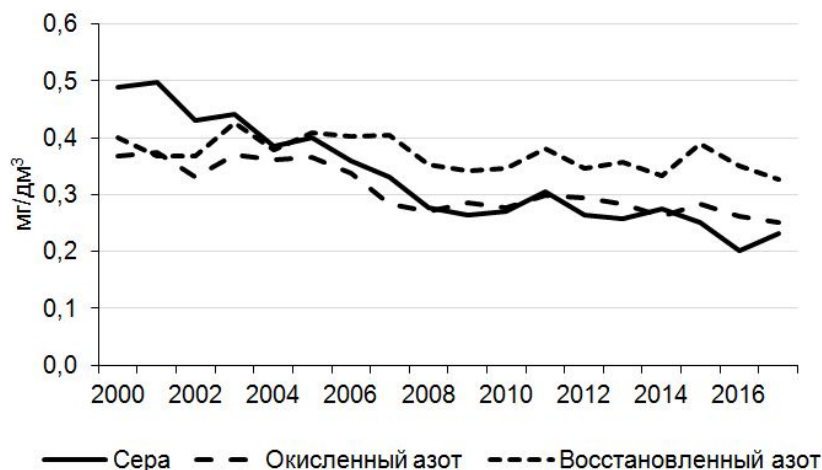


Рис. 4. Динамика среднегодового содержания серы и азота в атмосферных осадках на станциях ЕМЕП за период с 2002 по 2017 г.

Fig. 4. Dynamics of annual mean concentrations of sulfur and nitrogen compounds in precipitation at EMEP stations from 2002 to 2017

Т а б л и ц а 3. Тренды годовых концентраций серы и азота в атмосферных осадках на станциях Программы ЕМЕП за период 2002–2017 гг.

Table 3. Trends of annual concentrations of sulfur and nitrogen in atmospheric precipitation at stations of the EMEP Program for the period 2002–2017

Параметр Parameter	Относительное сокращение за период, % Relative reduction for the period, %	Средняя скорость сокращения, мг/год Average speed reduction, mg/year
Сера всего	–43,0	–0,019
Сера, скорректированная на избыток сульфатов	–45,7	–0,013
Окисленный азот	–25,7	–0,006
Восстановленный азот	–9,0	–0,002
pH	6,2	0,021*

Примечание. \* – единиц pH/год.

Note. \* – pH units/years.

Благодаря технологическому развитию в промышленности и переходу с угля на нефть и газ выбросы  $\text{SO}_2$  и  $\text{NO}_x$  значительно снизились [17]. Однако выпадение восстановленного азота уменьшилось только на 4 % [18].

В оценке [4] на основании анализа глобального набора данных мониторинга влажных осадений за 2000–2002 и 2005–2007 гг. сделан вывод о том, что глобальные концентрации и осадения серы и азота характеризуются наиболее высокими уровнями вблизи выбросов и более чем на порядок ниже в районах, в основном свободных от антропогенного воздействия. Во многих частях мира влажные осадения восстановленного азота превышают осадения окисленного азота и продолжают увеличиваться. За рассмотренный период концентрации и осадения серы и азота в Северной Америке и Европе значительно снизились в соответствии с политикой сокращения выбросов. В то же время межгодовые изменения количества осадков вызывают большие колебания количества влажных отложений загрязняющих веществ. Это означает, что сокращение выбросов может не вызвать немедленного сокращения нагрузок на окружающую среду; в результате, несмотря на национальные или международные меры по снижению выбросов, могут быть превышены критические нагрузки на некоторых участках. Изменения глобального климата будут оказывать все большее влияние на уровни атмосферных выпадений, что подтверждает необходимость долгосрочных программ мониторинга для выявления изменений окружающей среды, вызванных выпадением загрязняющих веществ в естественные экосистемы с атмосферными осадками.

**Заключение.** Тренды изменения содержания серы и азота в атмосферных осадках на территории Минска за период с 2002 по 2019 г. коррелируют с общеевропейскими трендами содержания этих компонентов в атмосферных осадках. Среднегодовые темпы сокращения содержания серы и окисленного азота в атмосферных осадках в Минске близки сокращениям содержания этих компонентов в осадках на фоновых станциях в Европе, в то же время темпы сокращения содержания восстановленного азота в осадках существенно более высокие (почти в 3 раза выше). Это может быть интерпретировано как следствие роста площади города с сокращением поголовья скота, прочей сельскохозяйственной деятельности на его территории. Аммонийный азот менее подвержен дальнему переносу, чем окисленная сера и окисленный азот, соответственно локальные источники имеют большее влияние на содержание аммонийного азота в атмосферных осадках. Показано, что потенциал закисления природной среды в Минске снижался с 2005 по 2012 г. параллельно снижению выпадений серы и азота; в последующий период тренд потенциала закисления в основном следует тренду выпадения основных катионов.

**Благодарности.** Работа выполнена в рамках заданий Государственной программы научных исследований «Природопользование и экология», подпрограммы «Природные ресурсы и экологическая безопасность»; № госрегистрации 20160130 (2016–2018); № госрегистрации 20192480 (2019–2020).

**Acknowledgements.** The study has been performed within the tasks of the State Program of Scientific Research “Nature management and ecology”, subprogram “Natural resources and environmental safety”; state registration no. 20160130 (2016–2018); state registration no. 20192480 (2019–2020).

### Список использованных источников

1. 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, N 6. – P. 999–1008. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2004.10.036>
2. Galloway, J. N. Acid precipitation: natural versus anthropogenic components / J. N. Galloway, G. E. Likens, M. E. Hawley // *Science.* – 1984. – Vol. 226, N 4676. – P. 829–831. <https://doi.org/10.1126/science.226.4676.829>
3. Nitrogen and sulfur deposition on regional and global scales: a multimodel evaluation / F. Dentener [et al.] // *Global Biogeochem Cycles.* – 2006. – Vol. 20, N 4. – Art. GB4003. <https://doi.org/10.1029/2005gb002672>
4. 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. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.10.060>
5. 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, N 1. – Art. 50. <https://doi.org/10.1186/s12302-019-0234-9>
6. Manual for the GAW precipitation chemistry programme [Electronic resource] // QA/SAC – Americas. – Mode of access: [https://s3.us-east-2.amazonaws.com/envirovantage/GAW-PrecipChemManualNo160\\_Ammended15Oct2015.pdf](https://s3.us-east-2.amazonaws.com/envirovantage/GAW-PrecipChemManualNo160_Ammended15Oct2015.pdf). – Date of access: 24.06.2021.
7. EMEP manual for sampling and chemical analysis [Electronic resource]. EMEP/CCC-Report 1/95. March 1996. – Mode of access: [https://unece.org/fileadmin/DAM/ie/capact/ppp/pdfs/rws2/emep\\_man\\_e.pdf](https://unece.org/fileadmin/DAM/ie/capact/ppp/pdfs/rws2/emep_man_e.pdf). – Date of access: 24.06.2021.
8. Assessing the variations in the chemical composition of rainwater and air masses using the zonal and meridional index / Á. Keresztesi [et al.] // *Atmospheric Research.* – 2020. – Vol. 237. – Art. 104846. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.104846>
9. Charlson R. J., Rodhe H. Factors controlling the acidity of natural rainwater / R. J. Charlson, H. Rodhe // *Nature.* – 1982. – Vol. 295, N 5851. – P. 683–685. <https://doi.org/10.1038/295683a0>
10. Ежегодник. Состояние загрязнения атмосферы в городах на территории России за 2017–2019 г. / П. Ф. Свистов [и др.] // Главная геофизическая обсерватория имени А. И. Воейкова, Санкт-Петербург [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://voeikovmgo.ru/?option=com\\_content&view=article&id=40:perechen-materialov-izdannyykh-ggo&catid=41&Itemid=24&lang=ru](http://voeikovmgo.ru/?option=com_content&view=article&id=40:perechen-materialov-izdannyykh-ggo&catid=41&Itemid=24&lang=ru). – Дата доступа: 20.07.2021.
11. UNECE. Mapping Manual 2004. UNECE Convention on Long-range Transboundary Air Pollution, ICP Modelling and Mapping. 2004 [Electronic resource]. – Mode of access: [http://icpmapping.org/cms/zeigeBereich/5/manual\\_und\\_downloads.html](http://icpmapping.org/cms/zeigeBereich/5/manual_und_downloads.html). – Date of access: 20.02.2021.
12. Мониторинг атмосферного воздуха в Беларуси: Ежегодник состояния атмосферного воздуха. 2018 и 2019 год: Химический состав атмосферных осадков [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://rad.org.by/articles/vozduh/>. – Дата доступа: 24.05.2021.
13. Какарека, С. В. Тренды содержания диоксида серы в атмосферном воздухе Беларуси / С. В. Какарека // *Природопользование.* – 2017. – Вып. 31. – С. 24–34.
14. Национальная система мониторинга окружающей среды: Мониторинг атмосферного воздуха. Результаты наблюдений за 2016–2019 гг. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.nsmos.by/content/173.html>. – Дата доступа: 24.05.2021.



15. EMEP/CCC Reports 1975-2020 [Electronic resource]. – Mode of access: <https://projects.nilu.no/ccc/reports.html>. – Date of access: 04.03.2021.
16. Air pollution trends in the EMEP region between 1990 and 2012. Joint Report of the EMEP Task Force on Measurements and Modelling (TFMM), Chemical Co-ordinating Centre (CCC), Meteorological Synthesizing Centre-East (MSC-E), Meteorological Synthesizing Centre-West (MSC-W). EMEP/CCC-Report 1/2016 [Electronic resource]. – Mode of access: [https://unece.org/fileadmin/DAM/env/documents/2016/AIR/Publications/Air\\_pollution\\_trends\\_in\\_the\\_EMEP\\_region.pdf](https://unece.org/fileadmin/DAM/env/documents/2016/AIR/Publications/Air_pollution_trends_in_the_EMEP_region.pdf). – Date of access: 24.06.2021.
17. Fagerli, H. Trends of nitrogen in air and precipitation: Model results and observations at EMEP sites in Europe 1980–2003 / H. Fagerli, W. Aas // *Environ. Pollut.* – 2008. – Vol. 154, N 3. – P. 448–461. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2008.01.024>
18. Twenty-five years of continuous sulphur dioxide emission reduction in Europe / V. Vestreng [et al.] // *Atmos. Chem. Phys.* – 2007. – Vol. 7, N 13. – P. 3663–3681. <https://doi.org/10.5194/acp-7-3663-2007>

## References

1. 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, no. 6, pp. 999–1008. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2004.10.036>
2. Galloway J. N., Likens G. E., Hawley M. E. Acid precipitation: natural versus anthropogenic components. *Science*, 1984, vol. 226, no. 4676, pp. 829–831. <https://doi.org/10.1126/science.226.4676.829>
3. Dentener F., Drevet J., Lamarque J.-F., Bey I., Eickhout B., Fiore A. M., Hauglustaine D., Horowitz L. W., Krol M., Kulshrestha U. C., Lawrence M., Galy-Lacaux C., Rast S., Shindell D., Stevenson D., Noije T., Atherton C., Bell N., Bergman D., Butler T., Cofala J., Collins B., Doherty R., Ellingsen K., Galloway J., Gauss M., Montanaro V., Müller J. F., Pitari G., Rodriguez J., Sanderson M., Solomon F., Strahan S., Schultz M., Sudo K., Szopa S., Wild O. Nitrogen and Sulfur Deposition on Regional and Global Scales: A Multimodel Evaluation. *Global Biogeochemical Cycles*, 2006, vol. 20, no. 4, art. GB4003. <https://doi.org/10.1029/2005gb002672>
4. Vet R., Artz R. S., Carou S., Shaw M., Ro Ch.-Un, Aas W., Baker A., Bowersox Van C., 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. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.10.060>
5. Keresztesi Á., Birsan M. V., Nita I. A., Bodor Z., Szép R. 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. <https://doi.org/10.1186/s12302-019-0234-9>
6. *Manual for the GAW precipitation chemistry programme. QA/SAC – Americas*. Available at: [https://s3.us-east-2.amazonaws.com/envirovantage/GAW-PrecipChemManualNo160\\_Ammended15Oct2015.pdf](https://s3.us-east-2.amazonaws.com/envirovantage/GAW-PrecipChemManualNo160_Ammended15Oct2015.pdf). (accessed 24 June 2021).
7. *EMEP manual for sampling and chemical analysis. EMEP/CCC-Report 1/95*. 1996. Available at: [https://unece.org/fileadmin/DAM/ie/capact/ppp/pdfs/rws2/emep\\_man\\_e.pdf](https://unece.org/fileadmin/DAM/ie/capact/ppp/pdfs/rws2/emep_man_e.pdf) (accessed 24 June 2021).
8. Keresztesi Á., Nita I.-A., Birsan M.-V., Bodor Z., Pernyeszi T., Micheu M. M., Szép R. Assessing the variations in the chemical composition of rainwater and air masses using the zonal and meridional index. *Atmospheric Research*, 2020, vol. 237, art. 104846. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.104846>
9. Charlson R. J., Rodhe H. Factors controlling the acidity of natural rainwater. *Nature*, 1982, vol. 295, no. 5851, pp. 683–685. <https://doi.org/10.1038/295683a0>
10. Svistov P. F., Pershina N. A., Polishchuk A. I., Pavlova M. T., Semenets E. S. *The state of atmospheric pollution in cities on the territory of Russia for 2017–2019. Voeikov Main Geophysical Observatory, St. Petersburg*. Available at: [http://voeikovmgo.ru/?option=com\\_content&view=article&id=40:perechen-materialov-izdannyykh-ggo&catid=41&Itemid=24&lang=ru](http://voeikovmgo.ru/?option=com_content&view=article&id=40:perechen-materialov-izdannyykh-ggo&catid=41&Itemid=24&lang=ru) (accessed 20 July 2021).
11. *UNECE. Mapping Manual 2004. UNECE Convention on Long-range Transboundary Air Pollution, ICP Modelling and Mapping. 2004*. Available at: [http://icpmapping.org/cms/zeigeBereich/5/manual\\_und\\_downloads.html](http://icpmapping.org/cms/zeigeBereich/5/manual_und_downloads.html) (accessed 20 July 2021).
12. *Monitoring of atmospheric air in Belarus. Yearbook of the state of atmospheric air. 2018 and 2019. Chemical composition of atmospheric precipitation*. Available at: <https://rad.org.by/articles/vozduh/> (accessed 24 May 2021).
13. Kakareka S. V. Trends of sulfur dioxide content in the atmospheric air on the territory of Belarus. *Prirodopol'zovanie [Nature Management]*, 2017, vol. 31, pp. 24–34 (in Russian).
14. *National system of environmental monitoring. Monitoring of atmospheric air. Observation results for 2016–2019*. Available at: <https://www.nsmos.by/content/173.html> (accessed 24 May 2021).
15. *EMEP/CCC Reports 1975-2020*. Available at: <https://projects.nilu.no/ccc/reports.html> (accessed 04 March 2021).
16. *Air pollution trends in the EMEP region between 1990 and 2012*. Joint Report of the EMEP Task Force on Measurements and Modelling (TFMM), Chemical Co-ordinating Centre (CCC), Meteorological Synthesizing Centre-East (MSC-E), Meteorological Synthesizing Centre-West (MSC-W). EMEP/CCC-Report 1/2016. Available at: [https://unece.org/fileadmin/DAM/env/documents/2016/AIR/Publications/Air\\_pollution\\_trends\\_in\\_the\\_EMEP\\_region.pdf](https://unece.org/fileadmin/DAM/env/documents/2016/AIR/Publications/Air_pollution_trends_in_the_EMEP_region.pdf) (accessed 24 June 2021).

17. 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, no. 3, pp. 448–461. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2008.01.024>

18. Vestreng V., Myhre G., Fagerli H., Reis S., Tarrasón L. Twenty-five years of continuous sulphur dioxide emission reduction in Europe. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2007, vol. 7, no. 13, pp. 3663–3681. <https://doi.org/10.5194/acp-7-3663-2007>

### Информация об авторах

*Какарека Сергей Витальевич* – д-р техн. наук, профессор, заведующий лабораторией. Институт природопользования Национальной академии наук Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, Минск, Республика Беларусь). E-mail: sk001@yandex.ru.

*Кокоси Юлия Геннадьевна* – канд. географ. наук, ст. науч. сотрудник. Институт природопользования Национальной академии наук Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, Минск, Республика Беларусь). E-mail: y-kokosh@mail.ru.

*Кудревич Мария Александровна* – мл. науч. сотрудник. Институт природопользования Национальной академии наук Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, Минск, Республика Беларусь). E-mail: kudrevich.mary.1991@gmail.com.

### Information about the authors

*Kakareka Sergey V.* – D. Sc. (Engineering), Professor, Head of the Laboratory. Institute for Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, Skorina Str., 220076, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: sk001@yandex.ru.

*Kokosh Yuliya G.* – Ph. D. (Geography), Senior researcher. Institute for Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, Skorina Str., 220076, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: y-kokosh@mail.ru.

*Kudrevich Mariya A.* – Junior researcher. Institute for Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, Skorina Str., 220076, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: kudrevich.mary.1991@gmail.com.