

Сезонная изменчивость химического состава атмосферных осадков и влажных выпадений (по данным станций EANET-Приморская)

Игорь Иванович КОНДРАТЬЕВ
кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник
igor@tigdvo.ru
Тихоокеанский институт географии ДВО РАН

Аннотация. Химический состав осадков и атмосферных выпадений оказывают как позитивное, так и негативное воздействие на растительность и экосистемы в целом. Так, кислотные осадки приводят к усыханию хвойных лесов и деградации пресноводных водоемов. Увеличение концентраций соединений азота в атмосферных осадках, с одной стороны, благоприятствует росту растительности, а с другой – его чрезмерное выпадение затрудняет возобновление аборигенных лесов из-за более активного роста трав и кустарников. Химический состав осадков определяется как природными, так и антропогенными факторами. Источником загрязнения атмосферы являются выбросы в промышленных центрах. В восточной Азии крупнейшими источниками загрязнения атмосферы являются предприятия восточных провинций Китая. Воздушными потоками загрязняющие вещества переносятся на территории соседних стран, оказывая негативное воздействие на экосистемы региона. Основными загрязняющими веществами являются окислы серы и азота, поступающие на земную поверхность в виде влажных и сухих выпадений. На основе данных станций фоновый мониторинг EANET-Приморская за 2021 г. показана сезонная изменчивость концентраций основных ионов в осадках. Максимальные концентрации ионов характерны для весеннего периода, а минимальные наблюдаются во время летних муссонных дождей. Среднегодовые концентрации ионов в осадках убывают в следующем порядке: SO_4^{2-} (5.91), NO_3^- (1.65), NH_4^+ (1.16), Na^+ (1.03) и Ca^{2+} (0.93) мг/л. Уровни влажных выпадений на станции Приморская варьируют год от года и в среднем за период наблюдений составляли для $\text{N}(\text{NO}_3 + \text{NH}_4) - 0.94$ и $\text{S} - 1.08$ г/м²год. Сравнение потоков выпадений серы и азота на станциях EANET северо-восточной Азии показало, что в период 2018–2020 гг. на станции Приморская они составили: $\text{N} (0.96)$ и $\text{S} (1.18)$ г/м²год. На всех приведенных для сравнения станциях EANET потоки выпадений были выше, чем на Приморской, за исключением фоновой станции Монди, расположенной в горах Забайкалья.

Ключевые слова: атмосферные осадки, химический состав, выпадения азота, трансграничный перенос, фоновый мониторинг

Для цитирования: Кондратьев И.И. Сезонная изменчивость химического состава атмосферных осадков и влажных выпадений (по данным станций EANET-Приморская) // Тихоокеанская география. 2025. № 3. С. 65–72. https://doi.org/10.35735/26870509_2025_23_5.

The chemical composition of atmospheric precipitation and wet deposition in the Northeast Asia (by data of EANET Primorskaya Station)

Igor I. KONDRATIEV

Candidate of Geographical Sciences, Leading research associate

igor@tigdvo.ru

Pacific Geographical Institute FEB RAS, Vladivostok, Russia

Abstract. The chemical composition of precipitation and atmospheric deposition have both positive and negative effects on vegetation and ecosystems as a whole. Thus, acid precipitation leads to the drying of coniferous forests and degradation of freshwater bodies. An increase in nitrogen concentrations in atmospheric precipitation, on the one hand, favors the growth of vegetation, and on the other hand, it complicates the restoration of native forest vegetation due to a more active growth of shrubs and grasses. The chemical composition of precipitation is determined by both natural and anthropogenic factors. The source of air pollution is emissions into the atmosphere in industrial centers. In East Asia, the largest sources of atmospheric pollution are the eastern provinces of China. With air flows, these pollutants are transferred to neighboring countries, having a negative effect on the region's ecosystems. The main pollutants are oxides of sulfur and nitrogen entering the earth's surface in the form of wet and dry deposition. Based on the data from the EANET Primorskaya Background Monitoring Station for 2021, the seasonal variability of the concentrations of the main ions in precipitation is shown. The maximum concentrations of ions are typical for the spring period, and the minimum ones for summer monsoon rains. The average annual concentrations of ions in precipitation decrease in the following order: SO_4^{2-} (5.91), NO_3^- (1.65), NH_4^+ (1.16), Na^+ (1.03) and Ca_2^+ (0.93) mg/l. The levels of wet deposition at the Primorskaya Station vary from year to year and on average over the observation period were 0.94 for $\text{N}(\text{NO}_3 + \text{NH}_4)$ and 1.08 g/m² year for S. At all EANET stations given for comparison, the fallout flows were higher than on Primorskaya, with the exception of the Mondy Background Monitoring Station located in the mountains of Transbaikalia.

Keywords: atmospheric precipitation, chemical composition, nitrogen loss, transborder transfer, background monitoring

For citation: Kondratiev I.I. The chemical composition of atmospheric precipitation and wet deposition in the Northeast Asia (by data of EANET Primorskaya Station). *Pacific Geography*. 2025;(3):65-72. (In Russ.). https://doi.org/10.35735/26870509_2025_23_5.

Введение

В Российской Федерации контроль и изучение химического состава осадков проводятся посредством отбора проб на сети из 150 станций мониторинга и последующего их анализа в лабораториях региональных центров. Тридцать станций мониторинга химического состава осадков находится на территории Дальневосточного федерального округа [1].

Рост кислотности осадков в восточной Азии и трансграничный перенос загрязняющих веществ в регионе обусловили создание региональной сети мониторинга химического состава осадков EANET (Acid Deposition Monitoring Network in East Asia). Сеть станций EANET охватывает территорию КНР, Японии, Республики Корея, Монголии и ряда других стран [2]. В РФ находятся четыре станции EANET: Монди (фоновая), Иркутск (городская), Листвянка (сельская) и Приморская (сельская). Последняя расположена в Приморском крае и начала функционировать в 2002 г.

Результаты изучения данных сети мониторинга и исследование химического состава снежного покрова показали, что с 1980-х до середины 2000-х гг. на станциях Приморского края и юга Хабаровского наблюдалось повышение кислотности осадков. Одной из основных причин этого повышения является трансграничный перенос с территории Китая [3]. В 2010-х гг. отмечалось некоторое понижение кислотности осадков [4]. Этот период совпал с сокращением выбросов в атмосферу окислов серы в промышленных регионах Китая. При этом продолжился рост выбросов в аграрных районах, где широко используется каменный уголь в хозяйственных и производственных целях [4]. Исследования траекторий циклонов, принесших осадки на территорию Приморского края, показали, что их химический состав зависит от мест формирования и траекторий перемещения воздушных масс [5]. Сокращение частоты выхода на Приморье юго-западных циклонов, в основном ответственных за перенос загрязняющих веществ, по-видимому, явилось одной из причин изменения химического состава осадков.

В начале XXI в. в некоторых районах планеты отмечался возрастающий поток выпадений азота, что негативно сказывается на возобновление аборигенной лесной растительности [6]. Он был вызван все более увеличивающимся использованием азотных удобрений для производства сельскохозяйственной продукции. Растениями усваивается примерно 50 % азота, остальной попадает в водоемы и атмосферу. В атмосфере воздушными потоками соединения азота могут перемещаться на большие расстояния и выпадать в виде осадков и взвешенных частиц, тем самым нарушая естественный баланс этого элемента в природе. Аномально высокое содержания азота в почве приводит к интенсивному росту трав и кустарников, что препятствует естественному возобновлению древесной растительности. Это создает угрозу возникновения пустошей на гарях и вырубках.

Поток выпадений серы и азота, межгодовая (за весь период наблюдений) динамика их содержания, сезонная изменчивость химического состава осадков были исследованы по данным станции EANET-Приморская. Для сравнения степени антропогенного воздействия на химический состав осадков в Приморье приведены данные некоторых станций EANET, расположенных в северо-восточной Азии.

Материалы и методы

Пробы осадков на станции EANET-Приморская отбираются каждые сутки (при их выпадении) в 9 ч по местному времени. Анализ химического состава осадков проводится в лаборатории мониторинга загрязнения атмосферы и почв (ЛМЗАиП) центра мониторинга окружающей среды Приморского УГМС. В пробах осадков определяются концентрации: SO_4^{2-} , Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , NO_3^- , NH_4^+ , Cl^- , HCO_3^- , а также показатель pH и электропроводность. Исследуемые параметры определяются: NO_3^- , NH_4^+ – спектрофотометрическим, Na, K, Ca, Mg – пламенно-фотометрическим, pH – потенциометрическим, SO_4^{2-} – нефелометрическим, Cl, HCO_3^- – меркуриметрическим и электропроводность – кондуктометрическими методами. Данные станций сети EANET ежегодно публикуются в отчетах (<http://www.eanet.cc/product.html>). Результаты анализа систематически тестируются как в лаборатории, проводящей анализ, так и в центре EANET.

Результаты и обсуждения

Сезонная изменчивость количества осадков и концентраций в них сульфатов, нитратов, аммония, кальция и натрия в 2021 г. показаны на графике (рис. 1). Значения количества осадков за каждые сутки и концентраций соответствующих ионов показаны на рисунке в виде точек. Чтобы наглядно представить изменчивость каждого распределения соответствующего элемента графика, они были аппроксимированы полиномом пятой

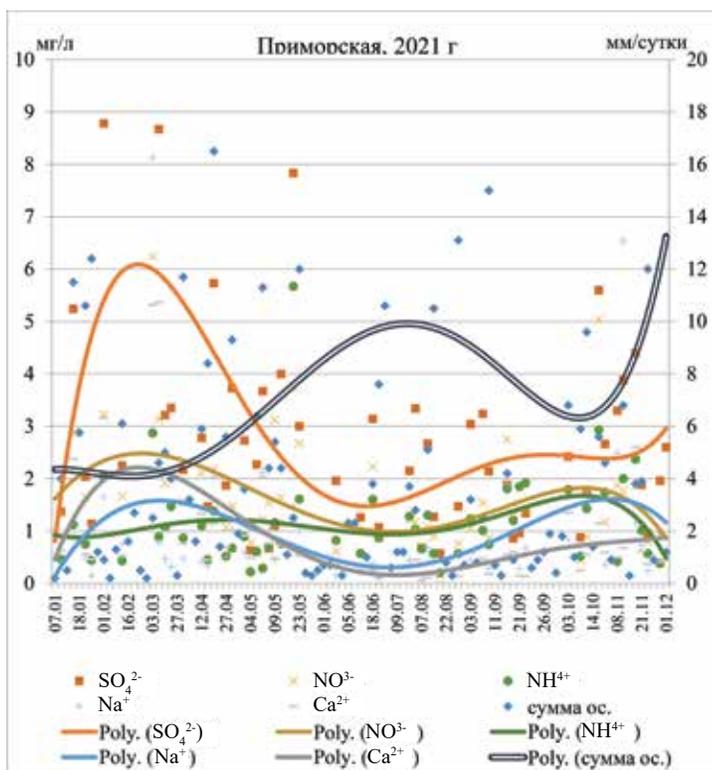


Рис. 1. Сезонная изменчивость суточных сумм осадков (мм) и концентраций в них сульфатов, нитратов, аммония, кальция и натрия (мг/л) на станции Приморская в 2021 г. (Точки -- количество осадков, выпавших за сутки, и концентрации ионов. Кривые – полиномиальные пятой степени, аппроксимирующие распределения концентраций)

Fig. 1. The seasonal variability of the daily precipitation amounts (mm) and concentrations (mg/l) of sulfates, nitrates, ammonium, calcium and sodium at the Primorskaya Station in 2021 (dots are the amounts of precipitation that fell per day and the concentrations of ions; curves are fifth-degree polynomials approximating the distributions of concentrations)

степени (стандартная операция программы Excel). Коэффициенты корреляции соответствующих распределений составили; для кальция 0.57, сульфатов 0.44, нитратов 0.42, натрия 0.33, аммония 0.25 и осадков 0.19. Наиболее достоверно аппроксимирующая кривая отражает распределение кальция и наименее достоверно – осадков. Изменчивость анализируемых параметров является типичной для всего периода наблюдений, хотя в отдельные года возможны отклонения, которые зависят от количества осадков и их распределения по сезонам.

В 2021 г. на станции Приморская выпало 724 мм осадков. Среднегодовые концентрации ионов в осадках составили: SO_4^{2-} (5.91), NO_3^- (1.65), NH_4^+ (1.16), Na^+ (1.03) и Ca^{2+} (0.93) мг/л. Концентрации ионов сульфатов, нитратов, кальция и натрия в осадках были наиболее высоки в весенний период. Как правило, в это время в атмосфере региона преобладает западно-восточный перенос воздушных масс, которые обогащены терригенной и антропогенной примесью. В процессе коагуляции взвешенного вещества в атмосфере, примесь частично растворяется облачной влагой, что является причиной повышенных ее концентраций в осадках.

В течение всего года наиболее высоки в осадках концентрации сульфатов. В целом повторяют их сезонную изменчивость концентрации нитратов, кальция, натрия и аммония.

Именно в такой последовательности они убывают в весенний период. Во время летних осадков последовательность изменчивости концентраций изменяется – в порядке убывания: сульфаты, нитраты, аммоний и натрий и кальций. При высокой влажности в атмосфере концентрация примеси в облачной влаге относительно сокращается и, к тому же, осадки в процессе выпадения очищают подоблачный слой атмосферы от аэрозоля. При всей условности такого анализа он отражает процессы сезонной изменчивости химического состава осадков.

В настоящее время на 11 % территории естественной растительности планеты выпадает азота значительно больше, чем величина порога «критической нагрузки», составляющая 10 кг (N)/га в год [6]. В восточной Азии наиболее высокие уровни выпадений наблюдаются в Китае, где в некоторых районах они достигают 40–50 кг (N)/га [7]. Изменчивость потока влажных выпадений серы и азота на станции Приморская за период 2002–2021 гг. показана на рис. 2. В среднем за весь период наблюдений объемы выпадений составили: $N(NO_3 + NH_4) - 0.94$ и $S - 1.08$ г/м² в год.

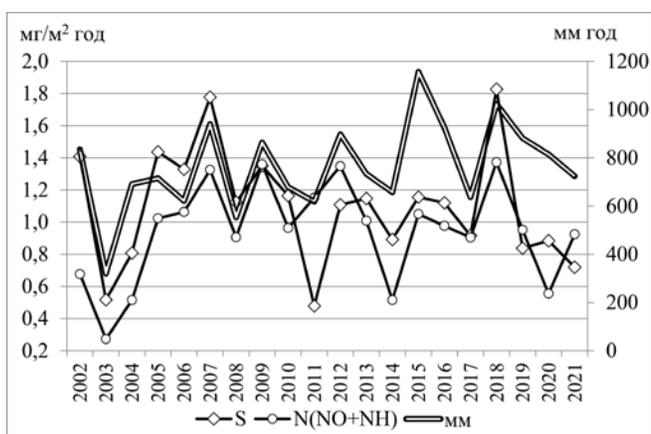


Рис. 2. Многолетняя изменчивость выпадений годовых сумм атмосферных осадков, серы и азота на станции Приморская в период 2002–2021 гг.

Fig. 2. The long-term variability of the annual amounts of precipitation, sulfur and nitrogen at Primorskaya Station in 2002–2021

Максимальных значений потока влажных выпадений серы и азота достигали в 2007 и 2018 гг. За весь период наблюдений на станции Приморская поток выпадений азота выше критического уровня в 10 кг (N)/га год наблюдался в течение 7 лет. Следует иметь в виду, что на сухие выпадения приходится от 10 до 40 % всех выпадений. Если учитывать вклад сухих выпадений, то суммарный поток азота на земную поверхность на фоновой станции будет находиться на границе или выше критического уровня.

Оценить уровни выпадений на станции Приморская в региональном масштабе позволяет сравнение с данными мониторинга в Северо-Восточной Азии (Китая и Японии) (рис. 3). Для станций EANET: Beijing-U (Urban), Beijing-R (Rural), Qingyuan (Rural), Ochiishi (Remote), Mondy (Remote) за период 2018–2020 гг. были приведены потоки выпадений азота, серы, кальция и магния.

Приведенные в вышеуказанной работе материалы были дополнены осредненными за три года (2018–2020 гг.) данными потоков выпадений на станции Приморская (см. табл.). Станция Приморская относится к категории Rural (сельских), что определяется ее расположением вблизи сельских населенных пунктов и относительной удаленности от городов Уссурийск и Владивосток.



Рис. 3. Расположение станций EANET в северо-восточной Азии. 1 – Пекин (Urban); 2 – Пекин (Rural); 3 – Qingyuan (Rural); 4 – Ochiishi (Remote); 5 – Mondy; 6 – Приморская (Rural)

Fig. 3. The location of Eanet stations in Northeastern Asia. 1 – Beijing (Urban); 2 – Beijing (Rural); 3 – Qingyuan (Rural); 4 – Ochiishi (Remote); 5 – Mondy; 6 – Primorskaya (Rural)

Из числа приведенных в таблице станций к категории фоновых относятся Монди (Mondy) в Забайкалье и Ochiishi на о. Хоккайдо. Станция Монди расположена на высоте 1600 м над уровнем моря в удаленном от центров антропогенной эмиссии районе. Три станции относятся к категории сельских и Пекин — к городской. Поток выпадений азота за период наблюдений 2018–2020 гг. на станции Приморская варьировал от 1.4 до 0.6 кг/га в год и в среднем составил 0.96 кг/га в год. Как видно из таблицы, только на фоновой станции Монди потоки выпадений азота, серы, кальция и магния ниже, чем на Приморской.

Таблица

Потоки выпадений азота, серы, кальция и магния на станциях EANET в северо-восточной Азии в 2017–2020 гг.

Table. Nitrogen, sulfur, calcium and magnesium fallout at Eanet stations in Northeastern Asia in 2017–2020

Areas	Period	pH	kg N (NO ₃) ha ⁻¹ y	kg N (NH ₄) ha ⁻¹ y	kg S (SO ₄) ha ⁻¹ y	kg Ca (Ca ²) ha ⁻¹ y	kg Mg (Mg ²) ha ⁻¹ y
Beijing-U (Urban)	2018–2020	6.4	7.3	15.4	14.6	20.9	2.6
Beijing-R (Rural)	2017–2018	6.7	4.5	11.9	6.0	31.7	4.5
Qingyuan (Rural)	2018–2020	6.2	5.9	8.4	5.6	8.9	1.7
Ochiishi (Remote)	2018–2020	5.1	1.0	1.0	2.8	1.2	2.0
Mondy (Remote)	2018–2020	5.3	0.2	0.2	0.3	0.4	0.1
Primorskay (Rural)	2018–2020	6.1	0.34	0.62	1.18	0.95	0.33

Примечание: составлено по данным [7, 8].

Более высокие уровни выпадений на фоновой станции Ochiishi, в сравнении с Приморской, по-видимому, объясняются локальным антропогенным воздействием промышленных центров Японии. Несмотря на то что уровни выпадений азота на станции Приморская близки к критическому, они все же ниже, чем в странах, граничащих с Приморским краем.

Заключение и выводы

Химический состав осадков и атмосферных выпадений является одним из важнейших показателей качества природной среды. С западно-восточным переносом воздушных масс с огромных территорий Центральной Азии, особенно в весенний период, выносятся и выпадает с осадками взвешенное и растворенное вещество, обогащающее почву необходимыми для жизнедеятельности химическими элементами. Вещества антропогенного происхождения оказывают преимущественно негативное воздействие. Так, кислотные осадки могут приводить к усыханию хвойных лесов и деградации пресноводных водоемов. Выпадения азотосодержащих соединений способствует росту растительности, но могут препятствовать возобновлению аборигенной растительности на вырубках и гарях. Результаты анализа данных мониторинга химического состава осадков на станции EANET-Приморская за 2021 г. показали, что наиболее высокие концентрации сульфатов, нитратов, кальция, натрия и аммония наблюдались в весенний период, во время активизации западно-восточного переноса воздушных масс. Понижение концентраций наблюдалось в период действия летнего муссона, приносящего осадки. Уровни выпадений азота и серы на станции Приморская ниже, чем на других станциях EANET в Северо-Восточной Азии (в Китае и Японии). Это свидетельствует о том, что территория Приморского края является акцептором атмосферной примеси, а не донором азота и серы в атмосферу. При этом уровни влажных выпадений азота на станции Приморская близки к значениям, представляющим опасность для процесса возобновления аборигенной лесной растительности.

Литература

1. Кондратьев И.И., Качур А.Н. Изменчивость кислотности осадков и потоков влажных выпадений серы и азота на территории Дальневосточного федерального округа России // География и природные ресурсы. 2023. № 2. С. 115–122.
2. Кондратьев И.И. Трансграничный атмосферный перенос аэрозоля и кислотных осадков на юг Дальнего Востока России. Владивосток: Дальнаука, 2014. 298 с.
3. Кондратьев И.И., Кубай Б.В., Семькина Г.И., Качур А.Н. Влияние трансграничного и природного факторов на химический состав осадков в Дальневосточном регионе России // Метеорология и гидрология. 2013. № 10. С 45–53.
4. Zhao Y., Zhang L., Chen Y., Liu X., Xu W., Pan Y., Duan L. Atmospheric nitrogen deposition to China: a model analysis on nitrogen budget and critical load exceedance // Atmospheric Environment. 2017. Vol. 153. P. 32–40.
5. Кондратьев И.И., Гришина М.А., Мезенцева Л.И. Зависимость влажных выпадений сульфатов и нитратов от траекторий циклонов // География и природные ресурсы. 2020. № 2. С 135–142.
6. Dentener F., Drevet J., Lamarque J., Bey I., Eickhout B. et al. Nitrogen and sulfur deposition on regional and global scales: A multimodel evaluation // Global biogeochemical cycles. 2006. Vol. 20, GB4003. DOI: 10.1029/2005GB002672.
7. Wang Y., Zhu F., Kang R., Song L., Huang S., Huang D., Huang K., Mgelwa A.S., Gurmessa G.A., Fang X., Fang Y. Chemical Composition and Deposition Characteristics of Precipitation into a Typical Temperate Forest in Northeastern China // Forests. 2024. Vol. 13, N 12. <https://doi.org/10.3390/f13122024>. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/365894898_Chemical_Composition_and_Deposition_Characteristics_of_Precipitation_into_a_Typical_Temperate_Forest_in_Northeastern_China (дата обращения: 12.02.2025)
8. Acid Deposition Monitoring Network in East Asia (EANET). [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://monitoring.eanet.asia/document/public/index> (дата обращения: 12.02.2025).

References

1. Kondratyev, I.I.; Kachur, A.N. The variability of the acidity of precipitation and streams of moist loss of sulfur and nitrogen in the territory of the Far Eastern Federal District of Russia. *Geography and natural resources*. 2023, 2, 115-122. (In Russian)
2. Kondratyev, I.I. The cross -border atmospheric transfer of aerosol and acid precipitation to the south of the Far East of Russia. *Dal'nauka: Vladivostok, Russia*. 2014; 300 p. (In Russian)
3. Kondratyev, I.I.; Kubai, B.V.; Semykina, G.I.; Kachur, A.N. The influence of cross -border and natural factors on the chemical composition of precipitation in the Far Eastern region of Russia. *Meteorology and Hydrology*. 2013, 10, 45-53. (in Russian)

4. Zhao, Y.; Zhang, L.; Chen, Y.; Liu, X.; Xu, W.; Pan, Y.; Duan, L. Atmospheric nitrogen deposition to China: a model analysis on nitrogen budget and critical load exceedance. *Atmospheric Environment*. 2017, 153, 32–40.
5. Kondratiev, I.I.; Grishina, M.A.; Mezentseva, L.I. The dependence of the moist loss of sulfates and nitrates on the trajectories of cyclones. *Geography and natural resources*. 2020, 2, 135-142. (In Russian)
6. Dentener, F.; Drevet, J.; Lamarque, J.; Bey, I.; Eickhout, B. et al. Nitrogen and sulfur deposition on regional and global scales: A multimodel evaluation. *Global biogeochemical cycles*. 2006, 20, GB4003. doi:10.1029/2005GB002672
7. Wang, Y.; Zhu, F.; Kang, R.; Song, L.; Huang, S.; Huang, D.; Huang, K.; Mgelwa, A.S.; Gurmesa, G.A.; Fang, X.; Fang Y. Chemical Composition and Deposition Characteristics of Precipitation into a Typical Temperate Forest in Northeastern China. *Forests*. 2024, 13, 12. <https://doi.org/10.3390/fl13122024>. Available online: https://www.researchgate.net/publication/365894898_Chemical_Composition_and_Deposition_Characteristics_of_Precipitation_into_a_Typical_Temperate_Forest_in_Northeastern_China (accessed on 12 February 2025).
8. Acid Deposition Monitoring Network in East Asia (EANET). Available online: <https://monitoring.eanet.asia/document/public/index>. (accessed on 12 February 2025).

Статья поступила в редакцию 7.04.2025; одобрена после рецензирования 30.04.2025; принята к публикации 15.05.2025.

The article was submitted on 7.04.2025; approved after reviewing on 30.04.2025; accepted for publication on 15.05.2025.

