

УДК 551.510.41; 556.114

Т.В. Носкова, Л.В. Колотушкина

E-mail: ntv@iwep.ru, kolotushkina l@iwep.ru

Ключевые слова: атмосферные осадки; сухое осаждение; влажное осаждение; основные ионы; химический состав атмосферы.

Дата поступления: 14.07.2025. Принята к печати: 4.08.2025

Процесс самоочищения атмосферы реализуется преимущественно через два механизма: влажное и сухое осаждение. Влажное связано с вымыванием загрязняющих веществ из воздуха облаками, туманами и осадками, в то время как сухое представляет собой гравитационное осаждение аэрозольных частиц и пыли на подстилающую поверхность [Amodio et al., 2014; Vet et al., 2014]. При этом способность к самоочищению атмосферы от примесей и динамика данного процесса зависит от многих условий: конденсации паров воды, вида формируемых осадков (снег, дождь), скорости осаждения частиц [Щыцура и др., 1998]. В свою очередь, скорость осаждения

частиц определяется метеорологическими факторами (скорость ветра, относительная влажность), характеристиками частиц (размер и форма) и подстилающей поверхности, которые оказывают влияние на то, как долго частицы могут мигрировать в атмосфере. На интенсивность очищения атмосферного воздуха также влияет интервал времени между осадками, поскольку в этих интервалах происходит накопление в атмосфере загрязняющих веществ [Amodio et al., 2014; Sanchez et al., 2015].

Вследствие этого соотношение вклада процессов сухого и влажного осаждения варьируется в зависимости от климатических условий. Для территорий умеренного и влажного климата – осаждения с дождем и снегом играют доминирующую роль в поступление химических веществ из атмосферы на подстилающую поверхность [Yu et al., 2014; Ye et al., 2018]. Поэтому в этих регионах часто пренебрегают подсчетом сухого осаждения, поскольку оно не оказывает существенного влияния на химический состав атмосферных выпадений [Petrescu et al., 2017]. Напротив, в аридных и семиаридных регионах, характеризующихся интенсивными пылевыми нагрузками, именно сухое осаждение может являться основным путем поступления загрязняющих веществ в окружающую среду [Kim et al., 2012; Samayamanthula et al., 2021].

Учитывая вышесказанное, отметим, что при исследовании атмосферных выпадений в условиях внутриконтинентальных регионов умеренного климата особенно остро встает вопрос о необходимости раздельного учета и анализа влажного и сухого осаждения. Эта задача приобретает особую значимость для территорий, расположенных на границе различных природно-климатических зон, каковой является Алтайский край. Совокупный подход, учитывающий оба пути поступления веществ, является обязательным условием для получения репрезентативных и методологически корректных результатов.

Таким образом, целью исследования является комплексная оценка качествен-

ных и количественных характеристик сухого и влажного выпадения основных ионов из атмосферы на подстилающую поверхность равнинного участка водосбора Верхней Оби (на примере г. Барнаула).

Материалы и методы

Для отбора проб влажного осаждения существуют множественные руководства как национального, так и международного уровней, но процесс отбора сухого осаждения ничем не регламентируется. Поэтому оценку его вклада в общее атмосферное осаждение в основном проводят с использованием расчетных моделей. Однако для точности вычисления и корректировки данных моделей необходимы полевые исследования. На наш взгляд, наиболее целесообразным способом оценки является раздельный отбор проб влажных *wet* (непосредственно за период их выпадения) и общих *bulk* (включающих сухие и влажные выпадения за временной интервал между окончаниями двух последовательных событий) атмосферных осадков. Содержание сухих *dry* атмосферных выпадений, в этом случае, определяется как разность между общим и влажным осаждением.

Место отбора проб находится на открытой площадке здания Института водных и экологических проблем СО РАН (25 м над поверхностью земли). Вблизи отсутствуют локальные источники загрязнения, а также нет очевидного барьера для поступления или перераспределения выпадающих осадков. Поэтому полученные результаты можно экстраполировать на всю городскую территорию. Количественный химический анализ проб на содержание основных ионов проводили с использованием аттестованных методик, разработанных и оптимизированных в Химико-аналитическом центре ИВЭП СО РАН [Овчаренко и др., 2015]. Перед анализом образцы твердых атмосферных осадков растапливали в специально подготовленных пластиковых контейнерах [Папина и др., 2018] при комнатной температуре. Образцы фильтровали

через мембранный фильтр с размером пор 0.45 мкм. Концентрацию PO_4^{3-} определяли фотометрическим методом с применением молибдата аммония на спектрофотометре DR 2800 (HACH Lange, Германия). Определение остальных ионов (NO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , NH_4^+) осуществляли методом ионной хроматографии с использованием безреагентной системы ICS-3000 (Dionex, США) и кондуктометрического детектора с технологией генерации элюента. Пределы определения составляли 0.01 мг/дм³ для PO_4^{3-} , 0.02 мг/дм³ для Ca^{2+} , 0.002 мг/дм³ для Na^+ , NH_4^+ , Cl^- и 0.001 мг/дм³ для NO_3^- , SO_4^{2-} , K^+ , Mg^{2+} .

Для обобщенной оценки атмосферных выпадений рассчитывали средневзвешенные концентрации определяемых ионов, которые являются наиболее информативной величиной, поскольку учитывают вклад каждого индивидуального события в среднюю (обобщенную) концентрацию иона в осадках за определенный временной период:

$$C_{vwm} = \frac{\sum_{i=1}^n (C_i \times V_i)}{\sum_{i=1}^n V_i}, \quad (1)$$

где C_{vwm} – средневзвешенная концентрация определяемого иона в атмосферных осадках, мкг/дм³; C_i – концентрация иона в индивидуальной пробе, мкг/дм³; V_i – водный эквивалент индивидуальной пробы, мм; n – число событий с осадками.

Для количественного сравнения сухих и влажных атмосферных выпадений была рассчитана скорость потока основных ионов по формуле 2.

$$F = \frac{C_{vwm} \times V_{mve} \times 0.01}{T}, \quad (2)$$

где F – средняя за изучаемый период скорость потока иона из атмосферы на подстилающую поверхность, мг·дм⁻²·сутки⁻¹; C_{vwm} – средневзвешенная по количеству осадков годовая (или сезонная) концентрация иона в осадках, мг/дм³; V_{mve} – водный эквивалент суммы осадков за изучаемый временной интервал, мм; T – временной период, сутки; 0.01 – коэффициент пересчета.

Результаты и обсуждение

Основными ионами, составляющими более 50% от их общей суммы в составе анионов или катионов в сухих и влажных выпадениях, являются SO_4^{2-} и Ca^{2+} . Это характерно для континентальных территорий [Xu et al., 2011; Чижова и др., 2017].

Как в сухих, так и во влажных атмосферных осадках количественное распределение анионов (эквивалентная концентрация) в течение теплого периода года совпадает и его можно представить следующей убывающей последовательностью: ($\text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{PO}_4^{3-}$). В то же время, катионный состав количественного распределения ионов в сухих выпадений ($\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+ > \text{NH}_4^+$) значительно отличается от влажных ($\text{Ca}^{2+} > \text{NH}_4^+ > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$). Благодаря большему заряду, меньшему радиусу и, как следствие, значительно более высокой плотности Mg^{2+} обладает большей способностью к адсорбции на поверхности взвешенных частиц в атмосферном воздухе по сравнению с Na^+ [Seinfeld, Pandis, 2016]. Однако основное различие катионного состава сухих и влажных выпадений связано с низкой долей иона аммония в сухих атмосферных осадках (рис. 1). Известно, что дополнительным источником NH_4^+ в атмосферном аэрозоле является газообразный аммиак [Смоляков и др., 2006]. В целом, с влажным осаждением на подстилающую поверхность преобладает поступление макроионов, предшественниками которых являются вещества в газообразной форме [Seinfeld, Pandis, 2016]. Поэтому ион аммония будет лучше вымываться из атмосферы с дождем, адсорбируясь на его каплях.

Количественное распределение катионов в сухих и влажных осадках в холодный период года полностью совпадают с теплым. В то же время в зимний сезон происходит увеличение доли хлорид-ионов, как в сухих, так и во влажных выпадениях ($\text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^- > \text{PO}_4^{3-}$) (рис. 2). Таким образом, для городских территорий в холодный период года характерно замещение NO_3^- на Cl^- в ряду количественного преобладания анионов.

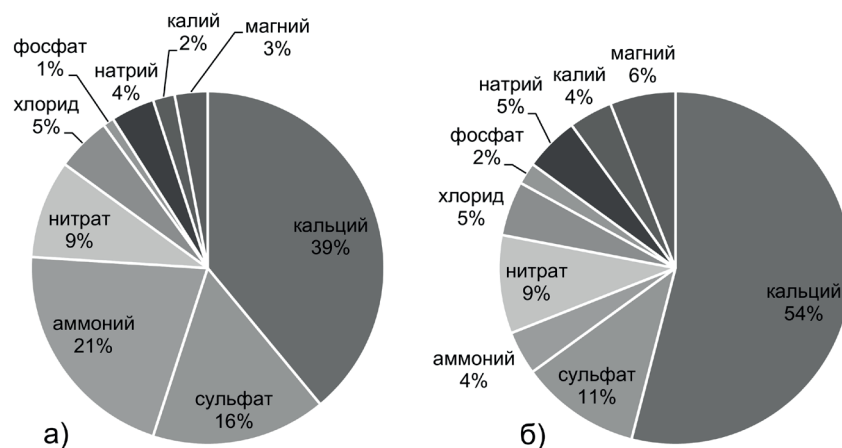


Рис. 1. Процентное содержание основных ионов в общей сумме во влажных (а) и сухих (б) выпадениях в теплый период года

Fig. 1. Percentage of major ions in the bulk in wet (a) and dry (b) precipitation during the warm season

Но выявленная тенденция пока еще не наблюдается в фоновых районах, согласно данным анализа снежного покрова, являющегося интегральной характеристикой зимних атмосферных осадков [Noskova et al., 2023]. Данное изменение ионного состава, может быть обусловлено, чрезмерным использованием противогололедных смесей на основе ионов хлора в течение зимы. При этом увеличение массовой концентрации ионов хлора в холодный сезон года отмечается также в атмосферных осадках других регионов Западной Сибири [Смоляков и др., 2006] и Центральной России [Еремина, 2019].

В таблице представлены величины атмосферных потоков сухого и влажного осаждения за год, рассчитанные с помощью формулы 2. Согласно данным табли-

цы, более высокие потоки исследуемых поллютантов наблюдаются в атмосферных выпадениях в виде дождя и снега. Вследствие этого главным механизмом осаждения основных ионов на 67–99% является именно влажное осаждение. Наблюдаемое различие в поведении анионов, а именно более высокий вклад сухого осаждения для F^- (33%) по сравнению с Cl^- (29%), имеет физико-химическое обоснование. Ион фтора, обладая меньшим ионным радиусом и, как следствие, более высокой плотностью заряда, демонстрирует большую склонность к адсорбции на поверхности взвешенных частиц (например, содержащих оксиды алюминия или кремния), чем хлорид-ион [Seinfeld, Pandis, 2016]. Эта особенность обуславливает его более эффективное удаление из атмосферы посредством процесса сухого осаждения.

Атмосферные осадки		
Период года	Влажные	Сухие
Теплый	$SO_4^{2-} > NO_3^- > Cl^- > PO_4^{3-}$	$SO_4^{2-} > NO_3^- > Cl^- > PO_4^{3-}$
	$Ca^{2+} > NH_4^+ > Mg^{2+} > Na^+ > K^+$	$Ca^{2+} > Mg^{2+} > Na^+ > K^+ > NH_4^+$
Холодный	$Ca^{2+} > NH_4^+ > Mg^{2+} > Na^+ > K^+$	$Ca^{2+} > Mg^{2+} > Na^+ > K^+ > NH_4^+$
	$SO_4^{2-} > Cl^- > NO_3^- > PO_4^{3-}$	$SO_4^{2-} > Cl^- > NO_3^- > PO_4^{3-}$

Рис. 2. Распределение ионов в сухих и влажных атмосферных осадках

Fig. 2. Ion distribution in dry and wet atmospheric precipitation

Таблица

Среднесуточные за год (с июля 2021 по июнь 2022 гг.) атмосферные потоки химических компонентов, поступившие в составе влажных и сухих осаджений на территорию г. Барнаула

Table

Annual average daily (from July 2021 to June 2022) atmospheric flows of chemical components entering the territory of Barnaul as part of wet and dry precipitation

Показатель, мкг·дм ⁻² ·сутки ⁻¹	Осаждение		Доля в общем объеме, %	
	Влажное	Сухое	Влажное	Сухое
NH ₄ ⁺	23.3	0.13	99	1
NO ₂ ⁻	0.43	0.06	89	11
NO ₃ ⁻	15.4	3.3	82	18
F ⁻	1.0	0.5	67	33
Cl ⁻	7.2	2.9	71	29
SO ₄ ²⁻	29.3	3.0	91	9
PO ₄ ³⁻	0.8	0.1	89	11
Na ⁺	3.7	1.7	68	32
K ⁺	1.9	0.5	79	21
Mg ²⁺	1.5	0.4	79	21
Ca ²⁺	27.5	8.0	77	23

Таким образом, в теплый и холодный период года наблюдаются явные отличия потоков макрокомпонентов, как в сухих, так и во влажных атмосферных осадках. При этом в годовом разрезе для всех определяемых веществ суточные потоки в составе влажных (дождь, снег) атмосферных выпадений превышают их суточные потоки в составе сухих выпадений.

Заключение

Проведенное исследование ионного состава сухих и влажных атмосферных осадков г. Барнаула позволило получить комплексную характеристику атмосферных выпадений на равнинной территории Алтайского края. Установлено преобладание сульфатов и кальция, что в целом типично для континентальных территорий. Рассмотрены сезонные изменения в количественной последовательности ионов. Выявлено вытеснение нитрат-иона хлорид-ионом в холодный период года на территориях, подверженных антропогенному воздействию, вероятным источником которого служат хлорсодержащие противогололедные реагенты. Данный фактор, по мере роста антропогенной нагрузки, способен оказать существенное влияние на форми-

рование регионального фоновое состава в холодный сезон, что обуславливает актуальность его учёта уже на настоящем этапе.

Расчет среднесуточных потоков химических компонентов показал, что для всех определяемых ионов основным путем их поступления из атмосферы на подстилающую поверхность является влажное осаждение. Его вклад варьирует от 67% (для F⁻) до 99% (для NH₄⁺). Таким образом, в условиях умеренного климата г. Барнаула именно влажное осаждение играет ключевую роль в процессе самоочищения атмосферы, но, несмотря на доминирование влажного осаждения, вклад сухого является статистически значимым и не должен игнорироваться. Таким образом, полученные данные подтверждают необходимость раздельного учета и анализа сухих и влажных атмосферных выпадений для корректной оценки атмосферной нагрузки не только на урбоэкосистемы, но и на окружающую среду в целом. Полученные результаты могут служить основой для: корректировки и верификации данных системы мониторинга атмосферного загрязнения; количественной оценки вклада атмосферных выпадений в формирование гидрохимического стока речных вод; разработки природоохранных мероприятий в регионе.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare that they have no conflict of interests.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИВЭП СО РАН.

Список литературы

- Алекин О.А. Основы гидрохимии. Л.: Гидрометеиздат, 1970. 444 с.
- Еремина И.Д. Химический состав атмосферных осадков в Москве и тенденции его многолетних изменений // Вестник Московского университета. Серия 5: География. 2019. № 3. С. 3–10.
- Овчаренко Е.А., Эйрих С.С., Папина Т.С. Оптимизация условий хроматографического разделения катионов методом ионной хроматографии при анализе атмосферных осадков // Вода: химия и экология. 2015. № 11(89). С. 69–75.
- Папина Т.С., Эйрих А.Н., Малыгина Н.С., Эйрих С.С., Останин О.В., Яшина Т.В. Микроэлементный и изотопный состав снежного покрова Катунского природного биосферного заповедника (Республика Алтай) // Лед и снег. 2018. Т. 58, № 1. С. 41–55. doi: 10.15356/2076-6734-2018-1-41-55
- Перельман А.И., Касимов Н.С. Геохимия ландшафтов. М.: Астрель-2000, 1999. 762 с.
- Смоляков Б.С., Шинкоренко М.П., Павлюк Л.А., Филимонова С.Н. Ионный состав и кислотность атмосферных осадков в Новосибирской области в 2000–2005 гг. // Оптика атмосферы и океана. 2006. Т. 19, № 6. С. 504–512.
- Цыцура А.А., Шипунов Б.П., Поляков А.А. Исследование способности атмосферы промышленного центра к самоочищению // Известия алтайского государственного университета. 1998. № 4. С. 87–90.
- Чиждова Ю.Н., Еремина И.Д., Буданцева Н.А., Суркова Г.В., Васильчук Ю.К. Использование изотопного метода при оценке атмосферных осадков Москвы // Гигиена и санитария. 2017. Т. 96, № 8. С. 737–743. doi: 10.18821/0016-9900-2017-96-8-737-743
- Amodio M., Catino S., Dambruoso P.R., Gennaro G., Di Gilio A., Giungato P., Laiola E., Marzocca A., Mazzone A., Sardaro A., Tutino M. Atmospheric Deposition: Sampling Procedures, Analytical Methods, and Main Recent Findings from the Scientific Literature // Advances in Meteorology. 2014. Vol. 2014. P. 161730. doi: 10.1155/2014/161730
- Kim J.E., Han Y.J., Kim P.R., Holsen T.M. Factors influencing atmospheric wet deposition of trace elements in rural Korea // Atmospheric Research. 2012. Vol. 116. P. 185–194. doi: 10.1016/j.atmosres.2012.04.013
- Noskova T., Lovtskaya O., Panina M., Ovcharenko E., Papina T. Ionic composition of winter atmospheric precipitation in the urban area (south of West Siberia, Russia) // Pollution. 2023. Т. 9, no. 1. С. 56–66. doi:10.22059/poll.2022.341261.1450
- Petrescu M., Bucur E., Diodiu R., Bratu M., Serbanescu A., Barbu M.E. Chemical characterization of wet depositions in urban and rural area // 20th International Symposium «The Environment and The Industry, SIMI 2017»: National Research and Development Institute for Industrial Ecology ECOIND. Bucharest, 2017. P. 213–220. doi: 10.21698/simi.2017.0027
- Samayamanthula D.R., Sabarathinam C., Alayyadhi N.A. Trace elements and their variation with pH in rain water in arid environment // Archives of Environmental Contamination and Toxicology. 2021. Vol. 80, no. 2. P. 331–349. doi: 10.1007/s00244-020-00787-y
- Sanchez A.S., Cohim E., Kalid R.A. A review on physicochemical and microbiological contamination of roof-harvested rainwater in urban areas // Sustainability of Water Quality and Ecology. 2015. Vol. 6. P. 119–137. doi: 10.1016/j.swaqe.2015.04.002
- Seinfeld, J.H., Pandis, S.N. Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change. New Jersey: John Wiley & Sons, 2016. 1149 p.

Vet R., Artz R. S., Carou S., et al. 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. P. 3–100. doi: 10.1016/j.atmosenv.2013.11.013

Xu H., Bi X.H., Feng Y.C., Lin F.M., Jiao L., Hong S.M., Liu W.G., Zhang X.Y. Chemical composition of precipitation and its sources in Hangzhou, China // *Environ Monit Assess*. 2011. Vol. 183. P. 581–592. doi: 10.1007/s10661-011-1963-4

Ye L., Huang M., Zhong B., Wang X., Tu Q., Sun H., Wang C., Wu L., Chang M. Wet and dry deposition fluxes of heavy metals in Pearl River Delta Region (China): Characteristics, ecological risk assessment, and source apportionment // *Journal of Environmental Sciences*. 2018. Vol. 70. P. 106–123. doi: 10.1016/j.jes.2017.11.019

Yu J., Ning K., Li Y., Du S., Han G., Xing Q., Wu H., Wang G., Gao Y. Wet and Dry Atmospheric Depositions of Inorganic Nitrogen during Plant Growing Season in the Coastal Zone of Yellow River Delta // *The Scientific World Journal*. 2014. P. 949213. doi:10.1155/2014/949213

References

Alekin O.A. *Osnovy gidrokhimii [Fundamentals of hydrochemistry]*. L.: Gidrometeoizdat, 1970. 444 p (in Russian).

Eremina I.D. Khimicheskij sostav atmosferykh osadkov v Moskve i tendencii ego mnogoletnikh izmenenij [Chemical composition of atmospheric precipitation in Moscow and the trends of its long-term changes] // *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5: Geografiya [Moscow University Bulletin. Series 5: Geography]* 2019. No. 3. P. 3–10 (in Russian).

Ovcharenko E.A., Eyrikh S.S., Papina T.S. Optimizatsiia uslovii khromatograficheskogo razdeleniia kationov metodom ionnoi khromatografii pri analize atmosferykh osadkov [Optimization of conditions for the chromatographic separation of cations by ion chromatography method in atmospheric precipitation analysis] // *Voda: khimiia i ekologiia [Water: Chemistry and Ecology]*. 2015. No. 11 (89). P. 69–75. (in Russian).

Papina T.S., Eyrikh A.N., Malygina N.S., Eyrikh S.S., Ostanin O.V., Yashina T.V. Mikroelementnyi i izotopnyi sostav snezhnogo pokrova katunskogo prirodnogo biosfernogo zapovednika (respublika Altai) [Microelement and stable isotopic composition of snowpack in the katunsky biosphere reserve (Altai republic)] // *Led i sneg [Ice and Snow]*. 2018. Vol. 58, no. 1. P. 41–55. doi: 10.15356/2076-6734-2018-1-41-55 (in Russian).

Perelman A.I., Kasimov N.S. *Geokhimiya landshaftov [Geochemistry of landscapes]*. M.: Astreya-2000, 1999. 762 p. (in Russian).

Smolyakov B.S., Shinkorenko M.P., Pavluik L.A., Filimonova S.N. Ionnyj sostav i kislotnost' atmosferykh osadkov v Novosibirskoj oblasti v 2000–2005 gg. [Ionic composition and acidity of atmospheric precipitations in the Novosibirsk region during 2000–2005] // *Optika Atmosfery i Okeana [Atmospheric and Oceanic Optics]*. 2006. Vol. 19, no. 6. P. 504–512. (in Russian).

Tsitsura A.A., Shipunov B.P., Polyakov V.V. Issledovanie sposobnosti atmosfery promyshlennogo centra k samoochishcheniyu [The investigation of capacity of the atmosphere industrial center to the autocleaning] // *Izvestiya altajskogo gosudarstvennogo universiteta [Izvestiya of Altai State University]*. 1998. No. 4. P. 87–90. (in Russian).

Chizhova Yu.N., Eremina I.D., Budantseva N.A., Surkova G.V., Vasilchuk Yu.K. Ispol'zovanie izotopnogo metoda pri ocenke atmosferykh osadkov Moskvy [The use of the isotopic method in the assessment of the urbanization of atmospheric precipitation in Moscow] // *Gigiena i sanitariya [Hygiene and sanitation]*. 2017. Vol. 96, no. 8. P. 737–743. doi: 10.18821/0016-9900-2017-96-8-737-743 (in Russian).

Amodio M., Catino S., Dambruoso P.R., Gennaro G., Di Gilio A., Giungato P., Laiola E., Marzocca A., Mazzone A., Sardaro A., Tutino M. Atmospheric Deposition: Sampling Procedures, Analytical Methods, and Main Recent Findings from the Scientific Literature // *Advances in Meteorology*. 2014. Vol. 2014. P. 161730. doi: 10.1155/2014/161730

Kim J.E., Han Y.J., Kim P.R., Holsen T.M. Factors influencing atmospheric wet deposition of trace elements in rural Korea // *Atmospheric Research*. 2012. Vol. 116. P. 185–194. doi: 10.1016/j.atmosres.2012.04.013

Noskova T., Lovtskaya O., Panina M., Ovcharenko E., Papina T. Ionic composition of winter atmospheric precipitation in the urban area (south of West Siberia, Russia) // *Pollution*. 2023. Vol. 9, no. 1. P. 56–66. doi:10.22059/poll.2022.341261.1450

Petrescu M., Bucur E., Diodiu R., Bratu M., Serbanescu A., Barbu M.E. Chemical characterization of wet depositions in urban and rural area // 20th International Symposium «The Environment and The Industry, SIMI 2017»: National Research and Development Institute for Industrial Ecology ECOIND. Bucharest, 2017. P. 213–220. doi: 10.21698/simi.2017.0027

Samayamanthula D.R., Sabarathinam C., Alayyadhi N.A. Trace elements and their variation with pH in rain water in arid environment // *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*. 2021. Vol. 80, no. 2. P. 331–349. doi: 10.1007/s00244-020-00787-y

Sanchez A.S., Cohim E., Kalid R.A. A review on physicochemical and microbiological contamination of roof-harvested rainwater in urban areas // *Sustainability of Water Quality and Ecology*. 2015. Vol. 6. P. 119–137. doi: 10.1016/j.swaqe.2015.04.002

Seinfeld, J.H., Pandis, S.N. *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change*. New Jersey: John Wiley & Sons, 2016. 1149 p.

Vet R., Artz R. S., Carou S., et al. 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. P. 3–100. doi: 10.1016/j.atmosenv.2013.11.013

Xu H., Bi X.H., Feng Y.C., Lin F.M., Jiao L., Hong S.M., Liu W.G., Zhang X.Y. Chemical composition of precipitation and its sources in Hangzhou, China // *Environ Monit Assess*. 2011. Vol. 183. P. 581–592. doi: 10.1007/s10661-011-1963-4

Ye L., Huang M., Zhong B., Wang X., Tu Q., Sun H., Wang C., Wu L., Chang M. Wet and dry deposition fluxes of heavy metals in Pearl River Delta Region (China): Characteristics, ecological risk assessment, and source apportionment // *Journal of Environmental Sciences*. 2018. Vol. 70. P. 106–123. doi: 10.1016/j.jes.2017.11.019

Yu J., Ning K., Li Y., Du S., Han G., Xing Q., Wu H., Wang G., Gao Y. Wet and Dry Atmospheric Depositions of Inorganic Nitrogen during Plant Growing Season in the Coastal Zone of Yellow River Delta // *The Scientific World Journal*. 2014. P. 949213. doi:10.1155/2014/949213

IONIC COMPOSITION OF DRY AND WET ATMOSPHERIC DEPOSITION IN BARNAUL (ALTAI KRAI)

T.V. Noskova, L.V. Kolotushkina

Institute for Water and Environmental Problems, Barnaul,

E-mail: ntv@iwep.ru, kolotushkina_l@iwep.ru

Analysis of atmospheric precipitation composition is essential not only for understanding processes of atmospheric pollution and self-purification, especially in regions situated at the border of natural-climatic zones, such as the Altai Krai, but also for assessing their role as a primary environmental component coupled with surface waters, which determines the main hydrochemical parameters of water bodies. This, in turn, affects their biogeochemical status

and quality. In this regard, the separate accounting of dry and wet deposition serves as an important tool for obtaining more accurate and representative data. The aim of this study is the comprehensive assessment of the qualitative and quantitative characteristics of dry and wet deposition of major ions onto the underlying surface of a flat watershed area of the Upper Ob, exemplified by the city of Barnaul. It was established that the principal ions in atmospheric precipitation are SO_4^{2-} and Ca^{2+} . Seasonal variations in the ionic composition of the atmosphere during the warm and cold periods of the year were identified. Flow calculations showed that wet deposition is the dominant pathway for the input of chemical substances onto the surface of the study area (67–99% for different major ions).

Keywords: atmospheric precipitation; dry deposition; wet deposition; major ions; chemical composition of the atmosphere.

Received: July 14, 2025. Accepted: August 4, 2025

Сведения об авторах

Носкова Татьяна Витальевна – кандидат технических наук, научный сотрудник Химико-аналитического центра Института водных и экологических проблем СО РАН. Россия, 656038, г. Барнаул, пр. Молодежная, д. 1. ORCID: 0000-0003-4960-8466. E-mail: ntv@iwep.ru.

Колотушкина Лилия Вячеславовна – младший научный сотрудник Химико-аналитического центра Института водных и экологических проблем СО РАН. Россия, 656038, г. Барнаул, пр. Молодежная, д. 1. ORCID: 0000-0003-2594-0659. E-mail: kolotushkina_l@iwep.ru.

Information about the authors

Noskova Tatiana Vitalievna – PhD in Engineering, Researcher at the Chemical-analytical Center of the Institute for Water and Environmental Problems SB RAS. 1, Molodezhnaya Str., 656038, Barnaul, Russia. ORCID: 0000-0003-4960-8466. E-mail: ntv@iwep.ru.

Kolotushkina Lilia Vyacheslavovna – Junior researcher at the Chemical-analytical Center of the Institute for Water and Environmental Problems SB RAS. 1, Molodezhnaya Str., 656038, Barnaul, Russia. ORCID: 0000-0003-2594-0659. E-mail: kolotushkina_l@iwep.ru.