

ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ENVIRONMENTAL MONITORING

DOI: 10.22363/2313-2310-2026-34-3-485-499

EDN: ESREXM

УДК 556.123:556.131.114

Научная статья / Research article

Скрининг химического состава атмосферных осадков и почвенных вод на водосборе оз. Гусиное Валдайской возвышенности

Д.Ю. Баранов , Т.И. Моисеенко *Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского, Москва, Российская
Федерация*✉ mitya.baranov.90@bk.ru

Аннотация. Представлены результаты гидрохимических наблюдений за составом атмосферных осадков и почвенных вод Валдайской возвышенности. Исследовано влияние крон деревьев и водно-температурного режима на формирование состава атмосферных осадков и типа элементарных ландшафтов на состав почвенных вод. Установлено, что при взаимодействии с кронами еловых деревьев гидрокарбонатно-кальциевый состав свободных осадков изменяется на гидрокарбонатно-калиевый. Основное поступление Ca, Mg, Na, K в подкروновые воды происходит за счет смыва пыли с крон деревьев. Выявлено, что pH почвенных вод растет с увеличением глубины формирования почвенных вод и не зависит от типа элементарного ландшафта. В почвенных водах транслювиального типа элементарного ландшафта снижается концентрация макрокатионов. С ростом глубины почвенных вод активизируется выщелачивание K, Na, Zn, Si, SO₄, что связано с изменением гранулометрического состава почвенных горизонтов.

Ключевые слова: элементарные ландшафты, свободные осадки, подкروновые воды, водно-температурный режим

Вклад авторов. Баранов Д.Ю. — проведение исследования, разработка методологии исследования, подготовка и написание черновика рукописи, работа с программным обеспечением. Моисеенко Т.И. — концептуализация, курирование данных, научное руководство исследованием, рецензирование и редактирование рукописи. Все авторы ознакомлены с окончательной версией статьи и одобрили ее.

Финансирование. Работа выполнена в рамках Госзадания Института геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН.

© Баранов Д.Ю., Моисеенко Т.И., 2026



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

Заявление о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Заявление об использовании технологий искусственного интеллекта. При создании настоящей статьи технологии генеративного искусственного интеллекта не использовались.

Заявление о доступности данных. Данные, использованные в этом исследовании, могут быть предоставлены автором по обоснованному запросу в связи с необходимостью соблюдения конфиденциальности участников.

История статьи: поступила в редакцию 25.11.2025; доработана после рецензирования 15.01.2026; принята к публикации 02.02.2026.

Для цитирования: Баранов Д.Ю., Моисеенко Т.И. Скрининг химического состава атмосферных осадков и почвенных вод на водосборе оз. Гусиное Валдайской возвышенности // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2026. Т. 34. № 3. С. 485–499. <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2026-34-3-485-499> EDN: ESREXM

Chemical composition screening of atmospheric precipitation and soil water in the Gusinoye Lake catchment area, the Valdai Upland

Dmitrii Yu. Baranov^{id}✉, Tat'yana I. Moiseenko^{id}

Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry, Moscow, Russian Federation
✉mitya.baranov.90@bk.ru

Abstract. This study presents the results of hydrochemical monitoring of the chemical composition of atmospheric precipitation and soil water in the Valdai Upland. The influence of tree crowns and water-temperature conditions on the composition of precipitation as well as the impact of elementary landscape types on the composition of soil has been investigated. It was found that interaction with spruce tree crowns changes the calcium-bicarbonate composition of free precipitation to potassium-bicarbonate. The main input of Ca, Mg, Na, and K into under-crown water occurs due to dust washout from tree crowns. It was revealed that the pH of soil water increases with increasing depth of soil water formation and is independent of the type of elementary landscape. The concentration of macrocations decreases in soil water of the transeuvial type of elementary landscape. With increasing depth of soil water, the leaching of K, Na, Zn, Si, and SO₄ is activated, which is associated with changes in the particle size distribution of soil horizons.

Keywords: elementary landscapes, bulk precipitation, throughfall, water temperature regime

Authors' contribution. D.Yu. Baranov — conducting the study, developing the research methodology, preparing and writing a draft of the manuscript, and using the software. T.I. Moiseenko — conceptualization, data curation, scientific supervision of the study, reviewing and editing the manuscript. All authors have read and approved the final version of the article.

Funding. The work was carried out within the framework of the State Assignment of the V.I. Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry of the Russian Academy of Sciences.

Conflicts of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Statement on the use of artificial intelligence technologies. No generative artificial intelligence technologies were used in the creation of this article.

Data availability. The data that support the findings of this study are available from the corresponding author upon reasonable request, due to the need to protect participant confidentiality.

Article history: received 25.11.2025; revised 15.01.2026; accepted 02.02.2026.

For citation: Baranov DYu, Moiseenko TI. Chemical composition screening of atmospheric precipitation and soil water in the Gusinoe Lake catchment area, the Valdai Upland. *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*. 2026;34(3):485–499. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2026-34-3-485-499> EDN: ESREXM

Введение

Валдайская возвышенность является чувствительным индикатором глобальных изменений окружающей среды, среди которых выделяются изменение климата и загрязнение воздуха [1]. В рамках международной программы по комплексному мониторингу воздействия загрязнения воздуха на экосистемы (Integrated Monitoring/UNECE) проведены исследования атмосферных осадков и почвенных вод. Химический состав атмосферных осадков формируется под влиянием природных и техногенных факторов. К основным природным факторам формирования состава атмосферных осадков относятся растворение газов и компонентов пыли континентального происхождения, а также влияние полога деревьев. Среди техногенных факторов выделяются выбросы в атмосферу загрязняющих веществ из антропогенных источников. Почвенные воды формируются при взаимодействии атмосферных осадков с почвенным субстратом. На формирование химического состава почвенных вод существенное влияние оказывают типы элементарных ландшафтов. Элементарный ландшафт представляет собой определенный тип рельефа, сложенный одной горной породой и покрытый в каждый момент своего существования определенным растительным сообществом, что характеризует одинаковое взаимодействие между горными породами и организмами [2]. Характерным элементом ландшафта Валдайской возвышенности являются грядово-холмистые формы образования рельефа, на которых формируются основные типы элементарного ландшафта по условиям миграции элементов: элювиальный и трансэлювиальный [3]. **Цель исследования** — влияние водно-температурного режима на состав атмосферных осадков и типа элементарных ландшафтов на состав почвенных вод в пределах катены Валдайской возвышенности на водосборе оз. Гусиное.

Объекты и методы

Участок исследования расположен северо-западнее г. Валдай на водосборе оз. Гусиное и оснащен осадкосборниками и лизиметрами для сбора проб атмосферных осадков и почвенных вод. Осадкосборники установлены на открытой территории (свободные осадки) и под кронами еловых деревьев (подкроновые воды), распространенных на исследуемом участке. Лизиметры установлены в почвенный субстрат с ненарушенным строением на глубине 30 см, данная глубина обуславливает поступление почвенных вод в лизиметры только за счет инфильтрации атмосферных осадков. Установка проботоотборников и отбор проб проводились согласно руководству, принятому в программе мониторинга [4; 5].

Описание почвенного разреза:

0–10 см — органический горизонт, сформировавшийся в аэробных условиях с кратким периодом насыщения влагой. Слой представлен лесной подстилкой в виде грубого гумуса мощностью до 5 см (мор) и мягкого гумуса минеральной части почвы мощностью до 5 см (муль);

10–20 см — иллювиальный горизонт, буровато-черно-серой окраски, содержащий аморфное органическое вещество, сложенный опесчаненным суглинком;

20–30 см — переходный горизонт, сложенный светло-бурым и коричневым флювиогляциальным песком средней крупности.

Начало периода отбора проб атмосферных осадков и почвенных вод в каждый год исследования (с 2015 по 2021 г.) определялось полным отсутствием снежного покрова, а окончание периода — первым выпадением осадков в виде снега. Влияние водно-температурного режима определялось по гидротермическому коэффициенту увлажнения (ГТК) Селянинова, были выделены следующие периоды: засушливый ($\text{ГТК} < 1$), достаточного увлажнения ($1 < \text{ГТК} < 2$) и избыточного увлажнения ($\text{ГТК} > 2$).

Измерение основных параметров (рН, Eh, электропроводность) проб атмосферных осадков и почвенных вод проводилось в полевых условиях; элементный состав — методами ICP-MS, ICP-AES (ELAN-DRC-e) в Институте геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского (ГЕОХИ РАН); анализ катионно-анионного состава методом ионообменной хроматографии (Dionex ICS-6000 EG, ГЕОХИ РАН) согласно соответствующим методикам¹.

¹ ГОСТ Р 56219-2014 (ИСО 17294-2:2003). Вода. Определение содержания 62 элементов методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой. Москва : Стандартинформ, 2015. 32 с.; ПНД Ф 14.1:2.4.131-98. Методика выполнения измерения массовых концентраций ионов натрия, калия, магния, кальция, бария и аммония в пробах питьевой, природной и сточной воды методом ионной хроматографии. ФР.131.2001.00335. Москва, 2010. 17 с.; ПНД Ф 14.1:2.4.132-98. Методика выполнения измерений массовой концентрации анионов: нитрита, нитрата, хлорида, фторида, сульфата и фосфата в пробах природной, питьевой и сточной воды методом ионной хроматографии. Москва, 1998 (издание 2008 г.). 17 с.

Обработка данных выполнялась с использованием программы GWB (Geochemist Workbench) и макроса QI Microsoft Excel для статистической обработки.

Результаты исследований

Атмосферные осадки. В зависимости от водно-температурного режима концентрация основных ионов в атмосферных осадках варьирует в достаточно широких пределах. Свободные осадки являются околонеutralными водами гидрокарбонатно-кальциевого состава с высокой долей участия ионов аммония и минерализацией в интервале 2,3–39 мг/л, отмечается резкое снижение средней минерализации от 18,2 мг/л в засушливый период до 7,4 мг/л в период избыточного увлажнения. Подкрановые воды являются подкисленными водами гидрокарбонатно-калиевого состава с высокой долей участия ионов кальция и сульфатов. В большинстве точек наблюдения минерализация подкрановых вод выше, чем свободных осадков и находится в интервале 4,6–61,5 мг/л. Как и в свободных осадках, отмечается резкое снижение средней минерализации от 26,9 мг/л в засушливый период до 9,9 мг/л в период избыточного увлажнения (рис. 1).

Выявлены достоверные ($p < 0,1$) отличия полученных рядов данных свободных осадков и подкрановых вод согласно непараметрическому критерию Вилкоксона, t -критерий = 1,9 (рис. 2). Наряду с минерализацией выявлено, что концентрации Ca, Mg, Na, K в атмосферных осадках и подкрановых водах максимальны в засушливый период и постепенно снижаются в периодах достаточного и избыточного увлажнения. Между концентрациями Mg, K в свободных осадках и подкрановых водах выявлены достоверные ($p < 0,1$) отличия рядов данных, согласно непараметрическому критерию Вилкоксона, t -критерий = 3,0; 4,2 для Mg, K соответственно.

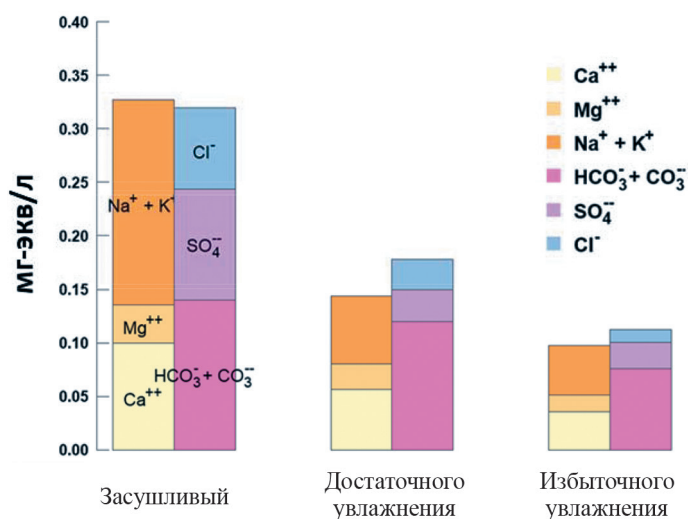


Рис. 1. Состав подкрановых вод при изменении водно-температурного режима

Источник: составлено Д.Ю. Барановым.

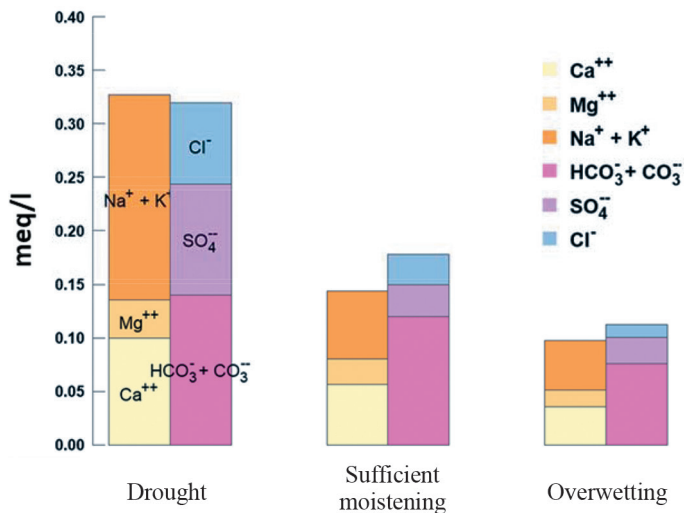


Figure 1. Composition of throughfall waters under changes of water-temperature regime
Source: compiled by D.Yu. Baranov.

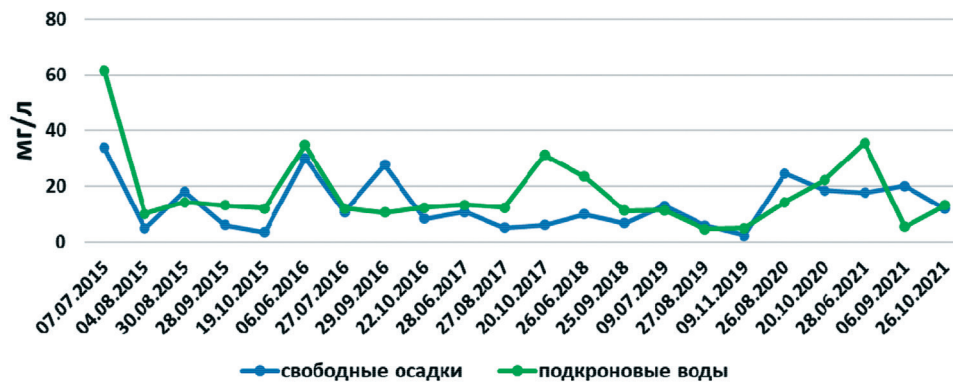


Рис. 2. Минерализация атмосферных осадков
Источник: составлено Д.Ю. Барановым.

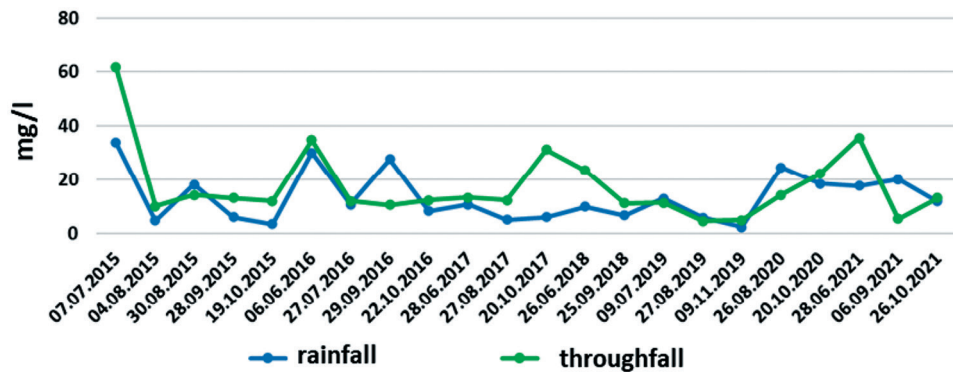


Figure 2. Mineralization of atmospheric precipitation
Source: compiled by D.Yu. Baranov.

При изменении водно-температурного режима большинство микро-элементов имеют максимальные концентрации в засушливый период. Подобная динамика не наблюдается для Zn, Mn в свободных осадках и для Cd в подкроновых водах. Для этих элементов характерна максимальная концентрация в период достаточного увлажнения (табл. 1).

Для Si, Al, Fe достоверно установлено ($p < 0,05$) увеличение их средних концентраций в подкроновых водах по сравнению со свободными осадками, t -критерий = $-4,0$; $-3,9$; $-3,8$ для Si, Al, Fe соответственно. Основным источником, обеспечивающим поступление Si, Al в атмосферные осадки, может быть выветривание почв [6; 7]. Содержание Al в атмосферных осадках Южно-Минусинской котловины, в районе которой действуют заводы по производству Al, варьирует от 0,4 до 1,6 мг/л, а на значительном удалении от предприятий отмечены концентрации до 0,1 мг/л [8]. Концентрации Al в свободных осадках менее 0,1 мг/л характерны для исследуемого участка Валдайского возвышенности. Среднее содержание Al в подкроновых водах в засушливый период превышает 0,1 мг/л, кроме того, периодическое превышение данного значения характерно для периодов достаточного и избыточного увлажнения, что связано с интенсивным вымыванием элемента из крон хвойных деревьев [9].

Таблица 1. Микроэлементный состав атмосферных осадков в зависимости от водно-температурного режима

Элемент	Свободные осадки			Подкроновые воды		
	Засушливый	Достаточного увлажнения	Избыточного увлажнения	Засушливый	Достаточного увлажнения	Избыточного увлажнения
Si ⁴⁺ , мкг/л	$\frac{67}{5,0-131}$	$\frac{41}{4,0-64}$	$\frac{24}{7,0-57}$	$\frac{222}{61-485}$	$\frac{110}{81-175}$	$\frac{91}{39-171}$
Al ³⁺ , мкг/л	$\frac{22}{4,7-51}$	$\frac{13}{3,7-38}$	$\frac{10}{0,8-37}$	$\frac{128}{11-544}$	$\frac{52}{28-106}$	$\frac{42}{21-171}$
Fe ²⁺ , мкг/л	$\frac{15}{0,5-32}$	$\frac{9,7}{3,0-21}$	$\frac{11}{2,5-31}$	$\frac{50}{27-99}$	$\frac{20}{3,3-38}$	$\frac{20}{2,1-36}$
Cu ²⁺ , мкг/л	$\frac{10}{3,0-46}$	$\frac{8,4}{3,3-18}$	$\frac{4,6}{1,0-9,7}$	$\frac{44}{27-99}$	$\frac{37}{22-70}$	$\frac{27}{15-37}$
Ni ²⁺ , мкг/л	$\frac{4,7}{0,4-29}$	$\frac{2,4}{0,1-11,2}$	$\frac{1,5}{0,1-12,5}$	$\frac{1,8}{0,7-5,3}$	$\frac{0,7}{0,4-1,6}$	$\frac{0,8}{0,4-1,1}$
Zn ²⁺ , мкг/л	$\frac{16}{4,6-27}$	$\frac{23}{9,6-40}$	$\frac{20}{0,6-54}$	$\frac{69}{27-129}$	$\frac{65}{43-103}$	$\frac{49}{36-84}$
Pb ²⁺ , мкг/л	$\frac{0,6}{0,1-2,2}$	$\frac{0,6}{0,1-2,5}$	$\frac{0,5}{0,1-1,2}$	$\frac{1,0}{0,4-2,9}$	$\frac{0,6}{0,4-1,1}$	$\frac{0,5}{0,4-0,7}$
Cd ²⁺ , мкг/л	$\frac{0,1}{0,06-0,2}$	$\frac{0,5}{0,01-3,1}$	$\frac{0,1}{0,03-0,5}$	$\frac{0,1}{0,07-0,2}$	$\frac{0,5}{0,04-2,8}$	$\frac{0,09}{0,06-0,2}$

Примечание. В знаменателе — среднее; в знаменателе — минимум — максимум.

Источник: составлено Д.Ю. Барановым.

Table 1. Microelement composition of atmospheric precipitation depending on water-temperature conditions

Element	Bulk precipitation (rainfall)			Throughfall water		
	Drought season	Sufficient moistening	Overwetting	Drought season	Sufficient moistening	Overwetting
Si ⁴⁺ , µg/l	$\frac{67}{5.0-131}$	$\frac{41}{4.0-64}$	$\frac{24}{7.0-57}$	$\frac{222}{61-485}$	$\frac{110}{81-175}$	$\frac{91}{39-171}$
Al ³⁺ , µg/l	$\frac{22}{4.7-51}$	$\frac{13}{3.7-38}$	$\frac{10}{0.8-37}$	$\frac{128}{11-544}$	$\frac{52}{28-106}$	$\frac{42}{21-171}$
Fe ²⁺ , µg/l	$\frac{15}{0.5-32}$	$\frac{9.7}{3.0-21}$	$\frac{11}{2.5-31}$	$\frac{50}{27-99}$	$\frac{20}{3.3-38}$	$\frac{20}{2.1-36}$
Cu ²⁺ , µg/l	$\frac{10}{3.0-46}$	$\frac{8.4}{3.3-18}$	$\frac{4.6}{1.0-9.7}$	$\frac{44}{27-99}$	$\frac{37}{22-70}$	$\frac{27}{15-37}$
Ni ²⁺ , µg/l	$\frac{4.7}{0.4-29}$	$\frac{2.4}{0.1-11.2}$	$\frac{1.5}{0.1-12.5}$	$\frac{1.8}{0.7-5.3}$	$\frac{0.7}{0.4-1.6}$	$\frac{0.8}{0.4-1.1}$
Zn ²⁺ , µg/l	$\frac{16}{4.6-27}$	$\frac{23}{9.6-40}$	$\frac{20}{0.6-54}$	$\frac{69}{27-129}$	$\frac{65}{43-103}$	$\frac{49}{36-84}$
Pb ²⁺ , мкг/л	$\frac{0.6}{0.1-2.2}$	$\frac{0.6}{0.1-2.5}$	$\frac{0.5}{0.1-1.2}$	$\frac{1.0}{0.4-2.9}$	$\frac{0.6}{0.4-1.1}$	$\frac{0.5}{0.4-0.7}$
Cd ²⁺ , µg/l	$\frac{0.1}{0.06-0.2}$	$\frac{0.5}{0.01-3.1}$	$\frac{0.1}{0.03-0.5}$	$\frac{0.1}{0.07-0.2}$	$\frac{0.5}{0.04-2.8}$	$\frac{0.09}{0.06-0.2}$

Note. In the numerator is the average; in the denominator is the minimum — maximum.

Source: compiled by D.Yu. Baranov.

В районе исследования наблюдается увеличение средних концентраций Zn — в 4 раза и незначительное увеличение для Cu. При отсутствии источников загрязнения концентрация Zn в атмосферных осадках варьирует от 10 до 40 мкг/л, содержание Cu — от 2,5 до 13,4 мкг/л [10; 11]. Полученные концентрации Cu, Zn в свободных осадках не выходят за рамки фоновых содержаний, представленных в литературе, за исключением единичных значений. Биогенное поступление элементов характеризуется повышенными концентрациями Cu, Zn в подкroновых водах. Данные о содержании Cu, Zn в свободных осадках и подкroновых водах имеют достоверные различия ($p < 0,05$; t-критерий (Cu) = -4,0; t-критерий (Zn) = -3,9).

По сравнению с результатами исследований, проведенных в период с 1983 по 1987 г., в атмосферных осадках Валдайской возвышенности наблюдается снижение средних концентраций Cd в 2 раза, Pb — в 10 раз. Содержание Ni в свободных осадках почти в 2 раза превышает концентрации, приведенные в литературе, что может указывать на влияние трансграничного переноса аэротехногенного загрязнения [12]. Согласно литературным данным, содержание Ni в атмосферных выпадениях фонового региона варьирует от 1 мкг/л до 3 мкг/л, а в промышленных районах от 10 до 50 мкг/л [13]. Несмотря на то, что средние концентрации Ni в атмосферных осадках Валдайской возвышен-

ности находятся в диапазоне, характерном для фоновых района, в подкроновых осадках содержание Ni ниже, чем в свободных осадках. Можно предположить, что трансграничный перенос металла влияет на увеличение содержания Ni в свободных осадках. При этом данные о содержании Ni в свободных осадках и подкроновых водах имеют достоверные различия ($p < 0,05$; t -критерий = 2,0).

Почвенные воды. Содержание основных катионов (Ca, Mg, Na, K) в почвенных водах элювиального типа элементарного ландшафта в почвенном горизонте А увеличивается при изменении pH от слабокислого к нейтральному (табл. 2). Аналогичная тенденция наблюдается для основных анионов (Cl, NO₃, SO₄). Концентрация гидрокарбонатов, хлоридов, нитратов незначительно увеличивается при возрастании pH. Существенное увеличение при повышении значений pH с 3–4 до 5–7 наблюдается для K, Na — почти в 3 раза, для SO₄ в 7 раз. Таким образом, при варьировании pH от 5 до 7 в почвенные воды, выщелачиваются K, Na, SO₄. Сходная тенденция характерна для Zn, Cu, Ni, Cd, при этом увеличение Cu, Ni, Cd при повышении pH незначительно, а концентрация Zn возрастает в 3 раза, что может быть связано с комплексной и анионной формами миграции, характерной Zn. Концентрации Fe, Al, Co, Pb достаточно стабильны по глубине, что связано с разнообразием видов их химической миграции. Миграционная активность Fe слабо зависит от изменения pH среды и глубины формирования почвенных вод [14]. Согласно многочисленным исследованиям [15; 16], миграционная способность большинства микроэлементов увеличивается при снижении pH до кислых и слабокислых значений, в почвенных водах элювиального типа элементарного ландшафта подобная закономерность характерна для Mn. Содержание Si при увеличении pH значительно возрастает, что указывает на миграцию элемента в связанном с другими компонентами состояниями.

Таким образом, формирование химического состава почвенных вод элювиального ландшафта имеет разнонаправленные тренды и связано с изменением кислотно-основных свойств. В почвенных водах горизонта А содержание Mg практически постоянно, а с увеличением глубины его концентрация растет при увеличении pH. Для анионов наблюдается однонаправленный тренд изменения относительно изменения значений pH. При этом концентрация сульфатов возрастает от 2 до 7 раз, что может быть связано с геохимической миграцией анионов и невысоким биогеохимическим потреблением. Почвенные воды трансэлювиального типа элементарного ландшафта формируются при взаимодействии атмосферных осадков с почвенным субстратом при его наклонном залегании (3–6°). Для основных катионов и анионов отмечено повышение их содержаний (от 1,5 до 2 раз) с увеличением величины pH, хотя их средние содержания ниже, чем для элювиального типа элементарного ландшафта (для катионного состава), что может быть связано с повышенной миграцией элементов за счет горизонтального стока. Содержание таких ми-

кроэлементов, как Si, Al, Fe, Cu, Zn, Ni, Co, Pb, Cd, растет при увеличении pH среды. Для Mn выявлено снижение его концентрации при увеличении pH, что связано с окислительно-восстановительными процессами при участии гумусовых веществ. Независимо от изменения глубины почвенных вод в условиях трансэлювиального ландшафта содержание Ca, Mg, Na, гидрокарбонатов и хлоридов снижается.

Таблица 2. Химический состав почвенных вод элювиального и трансэлювиального типов элементарных ландшафтов

Тип элементарного ландшафта	Элювиальный			Трансэлювиальный	
Диапазон pH	3–4	4–5	5–7	< 5,5	> 5,5
Ca ²⁺ , мг/л	$\frac{1,1}{0,5-1,9}$	$\frac{1,5}{1,1-1,9}$	$\frac{2,2}{1,4-3,7}$	$\frac{0,8}{0,3-1,4}$	$\frac{1,7}{0,7-3,7}$
Mg ²⁺ , мг/л	$\frac{0,3}{0,2-0,6}$	$\frac{0,4}{0,3-0,4}$	$\frac{0,4}{0,2-0,6}$	$\frac{0,3}{0,2-0,5}$	$\frac{0,4}{0,2-1,0}$
Na ⁺ , мг/л	$\frac{0,3}{0,2-0,6}$	$\frac{0,5}{0,3-1,0}$	$\frac{1,5}{0,4-3,7}$	$\frac{0,3}{0,1-0,6}$	$\frac{1,2}{0,3-3,9}$
K ⁺ , мг/л	$\frac{1,2}{0,1-2,8}$	$\frac{1,5}{0,3-2,6}$	$\frac{2,2}{0,2-9,3}$	$\frac{0,8}{0,2-1,5}$	$\frac{1,6}{0,2-2,4}$
HCO ₃ ⁻ +, CO ₃ ²⁻ мг/л	<ПО	$\frac{2,7}{0,01-7,1}$	$\frac{5,5}{3,0-9,0}$	$\frac{3,0}{0,1-5,5}$	$\frac{7,3}{4,1-12}$
Cl ⁻ , мг/л	$\frac{1,3}{0,3-2,9}$	$\frac{1,6}{0,4-3,0}$	$\frac{2,5}{0,5-7,9}$	$\frac{0,6}{0,2-1,2}$	$\frac{1,4}{0,2-5,0}$
NO ₃ ⁻ , мг/л	$\frac{0,7}{0,3-2,4}$	$\frac{0,9}{0,4-1,8}$	$\frac{0,9}{0,1-3,5}$	$\frac{0,8}{0,1-2,5}$	$\frac{0,7}{0,1-2,6}$
SO ₄ ²⁻ , мг/л	$\frac{2,4}{1,0-3,2}$	$\frac{2,6}{1,7-4,2}$	$\frac{4,7}{1,2-11,4}$	$\frac{1,3}{0,6-2,4}$	$\frac{2,0}{1,0-3,7}$
Si ⁴⁺ , мкг/л	$\frac{59}{30-92}$	$\frac{119}{57-165}$	$\frac{110}{70-170}$	$\frac{66}{16-132}$	$\frac{90}{50-210}$
Al ³⁺ , мкг/л	$\frac{115}{21-196}$	$\frac{128}{86-168}$	$\frac{120}{86-157}$	$\frac{39}{26-57}$	$\frac{65}{22-142}$
Fe ²⁺ , мкг/л	$\frac{310}{190-414}$	$\frac{374}{310-450}$	$\frac{366}{226-480}$	$\frac{104}{18-182}$	$\frac{150}{60-243}$
Mn ²⁺ , мкг/л	$\frac{197}{100-300}$	$\frac{190}{120-310}$	$\frac{140}{45-265}$	$\frac{76}{26-175}$	$\frac{58}{21-156}$
Cu ²⁺ , мкг/л	$\frac{28}{10-47}$	$\frac{42}{30-66}$	$\frac{62}{21-103}$	$\frac{32}{14-43}$	$\frac{43}{18-106}$
Ni ²⁺ , мкг/л	$\frac{3,2}{2,0-6,4}$	$\frac{3,0}{2,4-3,7}$	$\frac{4,3}{0,9-8,2}$	$\frac{2,3}{1,6-4,2}$	$\frac{4,2}{1,9-9,7}$
Zn ²⁺ , мкг/л	$\frac{43}{10-87}$	$\frac{92}{47-147}$	$\frac{100}{59-195}$	$\frac{88}{19-172}$	$\frac{157}{73-269}$
Pb ²⁺ , мкг/л	$\frac{1,8}{0,1-3,8}$	$\frac{1,7}{1,3-2,3}$	$\frac{2,0}{0,1-4,3}$	$\frac{0,4}{0,1-0,7}$	$\frac{1,2}{0,5-3,9}$

Примечание. В знаменателе — среднее; в знаменателе — минимум — максимум.

Источник: составлено Д.Ю. Барановым.

Table 2. Chemical composition of soil waters of eluvial and transeluvial types of elementary landscapes

Type of elementary landscape	Eluvial			Transeluvial	
Range of pH	3–4	4–5	5–7	< 5.5	> 5.5
Ca ²⁺ , mg/l	$\frac{1.1}{0.5-1.9}$	$\frac{1.5}{1.1-1.9}$	$\frac{2.2}{1.4-3.7}$	$\frac{0.8}{0.3-1.4}$	$\frac{1.7}{0.7-3.7}$
Mg ²⁺ , mg/l	$\frac{0.3}{0.2-0.6}$	$\frac{0.4}{0.3-0.4}$	$\frac{0.4}{0.2-0.6}$	$\frac{0.3}{0.2-0.5}$	$\frac{0.4}{0.2-1.0}$
Na ⁺ , mg/l	$\frac{0.3}{0.2-0.6}$	$\frac{0.5}{0.3-1.0}$	$\frac{1.5}{0.4-3.7}$	$\frac{0.3}{0.1-0.6}$	$\frac{1.2}{0.3-3.9}$
K ⁺ , mg/l	$\frac{1.2}{0.1-2.8}$	$\frac{1.5}{0.3-2.6}$	$\frac{2.2}{0.2-9.3}$	$\frac{0.8}{0.2-1.5}$	$\frac{1.6}{0.2-2.4}$
HCO ₃ ⁻ +, CO ₃ ²⁻ mg/l	<ПО	$\frac{2.7}{0.01-7.1}$	$\frac{5.5}{3.0-9.0}$	$\frac{3.0}{0.1-5.5}$	$\frac{7.3}{4.1-12}$
Cl ⁻ , mg/l	$\frac{1.3}{0.3-2.9}$	$\frac{1.6}{0.4-3.0}$	$\frac{2.5}{0.5-7.9}$	$\frac{0.6}{0.2-1.2}$	$\frac{1.4}{0.2-5.0}$
NO ₃ ⁻ , mg/l	$\frac{0.7}{0.3-2.4}$	$\frac{0.9}{0.4-1.8}$	$\frac{0.9}{0.1-3.5}$	$\frac{0.8}{0.1-2.5}$	$\frac{0.7}{0.1-2.6}$
SO ₄ ²⁻ , mg/l	$\frac{2.4}{1.0-3.2}$	$\frac{2.6}{1.7-4.2}$	$\frac{4.7}{1.2-11.4}$	$\frac{1.3}{0.6-2.4}$	$\frac{2.0}{1.0-3.7}$
Si ⁴⁺ , µg/l	$\frac{59}{30-92}$	$\frac{119}{57-165}$	$\frac{110}{70-170}$	$\frac{66}{16-132}$	$\frac{90}{50-210}$
Al ³⁺ , µg/l	$\frac{115}{21-196}$	$\frac{128}{86-168}$	$\frac{120}{86-157}$	$\frac{39}{26-57}$	$\frac{65}{22-142}$
Fe ²⁺ , µg/l	$\frac{310}{190-414}$	$\frac{374}{310-450}$	$\frac{366}{226-480}$	$\frac{104}{18-182}$	$\frac{150}{60-243}$
Mn ²⁺ , µg/l	$\frac{197}{100-300}$	$\frac{190}{120-310}$	$\frac{140}{45-265}$	$\frac{76}{26-175}$	$\frac{58}{21-156}$
Cu ²⁺ , µg/l	$\frac{28}{10-47}$	$\frac{42}{30-66}$	$\frac{62}{21-103}$	$\frac{32}{14-43}$	$\frac{43}{18-106}$
Ni ²⁺ , µg/l	$\frac{3.2}{2.0-6.4}$	$\frac{3.0}{2.4-3.7}$	$\frac{4.3}{0.9-8.2}$	$\frac{2.3}{1.6-4.2}$	$\frac{4.2}{1.9-9.7}$
Zn ²⁺ , µg/l	$\frac{43}{10-87}$	$\frac{92}{47-147}$	$\frac{100}{59-195}$	$\frac{88}{19-172}$	$\frac{157}{73-269}$
Pb ²⁺ , µg/l	$\frac{1.8}{0.1-3.8}$	$\frac{1.7}{1.3-2.3}$	$\frac{2.0}{0.1-4.3}$	$\frac{0.4}{0.1-0.7}$	$\frac{1.2}{0.5-3.9}$

Note. In the numerator is the average; in the denominator is the minimum-maximum

Source: compiled by D.Yu. Baranov.

При увеличении глубины для почвенных вод элювиального типа элементарного ландшафта вод характерно стабильное повышение pH в диапазоне от 0,6 до 2,9, аналогичная тенденция зафиксирована в работе [17]. Смена почвенных горизонтов приводит к подщелачиванию почвенных вод, а значение pH в среднем увеличивается на 1,7. Варьирование значения электропроводности в среднем понижается при увеличении глубины на 25 мкСм/см; окисли-

тельно-восстановительный потенциал имеет тенденцию к снижению, однако амплитуда изменений варьирует от -200 до 500 мВ; цветность и значение перманганатной окисляемости снижается с глубиной, что соответствует уменьшению содержания гумуса почвы.

Среди основных ионов почвенных вод элювиального типа элементарного ландшафта вод в течение всего периода исследований увеличение глубины способствует значительному обогащению почвенных вод Na (около 2 мг/л), гидрокарбонат-ионами и сульфатами ($3,9$ и $2,4$ мг/л соответственно).

Тенденция к стабильному повышению концентраций микроэлементов в почвенных водах элювиального типа элементарного ландшафта вод с ростом глубины отмечается для Si, Ni, Zn. Рост концентрации Si связан с возрастанием содержания кварца в почвенных слоях по мере увеличения глубины. Рост концентрации Zn, вероятно, определяется его связями с различными органическими кислотами. Распространение за пределы почвенного горизонта А может быть обусловлено преобладающими связями с гуминовыми кислотами [18–20]. Для Ni характерно увеличение его содержания с глубиной, что обусловлено его высокой растворимостью и низким биопотреблением. Для Al, Fe, Mn отмечается устойчивое снижение их содержаний при возрастании глубины, что связано с изменением окислительно-восстановительной обстановки, в которой создаются условия для образования железо-марганцевых конкреций. Основная тенденция изменения содержания Pb, Cu имеет склонность к понижению с ростом глубины, что связано с тем, что Pb миграционно активен в комплексах с ацетатами, при увеличении глубины количество солей органических кислот резко снижается и может влиять на его содержание. Cu является биофильным элементом, и биопотребление в горизонте А более интенсивно, за счет чего концентрация Cu снижается.

При возрастании глубины в почвенных водах трансэлювиального типа элементарного ландшафта наблюдается устойчивый рост pH, незначительное снижение электропроводности и окислительно-восстановительного потенциала.

Поведение макрокатионов в почвенных водах трансэлювиального типа элементарного ландшафта отличается противоположным трендом относительно элювиального типа элементарного ландшафта: Ca, Mg, Na имеют преобладающую тенденцию к снижению концентрации при возрастании глубины, а содержание K увеличивается. Для сульфатов и нитратов характерно снижение их содержания с глубиной. Увеличение гидрокарбонат-ионов связано с увеличением содержания углекислого газа в более пористых почвах легкого гранулометрического состава.

Заключение

При проведении исследований было установлено, что свободные осадки являются околонеутральными водами гидрокарбонатно-кальциевого состава с высокой долей участия ионов аммония. Подкроновые воды — слабокислые

воды гидрокарбонатно-калиевого состава с высокой долей участия ионов кальция и сульфатов. При оценке влияния водно-температурного режима на состав атмосферных осадков выявлено, что основное поступление Ca, Mg, Na, K в подкروновые воды происходит за счет смыва с крон деревьев.

Влияние элементарных ландшафтов на формирование состава почвенных вод главным образом выражено за счет различия в наклоне рельефа и составе почвенных горизонтов. Ввиду того что тип почв и растительности элементарных ландшафтов идентичен, наклонность рельефа является ключевым фактором, влияющим на миграцию макрокатионов. Установлено, что с ростом глубины pH почвенных вод растет, а концентрация органических веществ снижается в пределах элювиального и трансэлювиального типов ландшафта. Изменение окислительно-восстановительных условий подзолистых почв способствует образованию железомарганцевых конкреций. Изменение pH почвенных вод от 3 до 7, происходящее за счет смены более тяжелого минералогического состава почв верхних горизонтов на более легкое нижних горизонтов, активизирует выщелачивание K, Na, Zn, Si, SO₄.

Список литературы / References

- [1] Limić I, Butorac L, Jakovljević T, Lovreškov L, Bratinčević MV, Bakšić D, Jelić G. Atmospheric deposition patterns in bulk open field precipitation and throughfall in Aleppo pine forest and black pine forest on the eastern Adriatic coast. *Environmental Research*. 2024;262:119723. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.119723> EDN: AXMTBU
- [2] Perelman AI, Kasimov NS. *Geochemistry of landscape*. Moscow: Moscow State University Publishing House; 1999. 610 p. (In Russ.).
Перельман А.И., Касимов Н.С. Геохимия ландшафта. Москва : Изд-во Московского государственного университета, 1999. 610 с.
- [3] Glazovskaya MA. *Geochemical foundations of the typology and methodology of natural landscape studies*. Smolensk: Oikumena Publ.; 2002. 288 p. (In Russ.).
Глазовская М.А. Геохимические основы типологии и методики исследований природных ландшафтов. Смоленск : Ойкумена, 2002. 288 с.
- [4] Clarke N, Žlindra D, Ulrich E, Mosello R, Derome J, Derome K, König N, Lövblad G, Draaijers GPJ, Hansen K, Thimonier A, Waldner P. *Part XIV: Sampling and Analysis of Deposition. Manual on methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forests*. Eberswalde, Germany: Thünen Institute of Forest Ecosystems; 2016. 32 p.
- [5] Nieminen TM., De Vos B, Cools N, König N, Fischer R, Iost S, Meesenburg H, Nicolas M, O’Dea P, Cecchini G, Ferretti M, De La Cruz A, Derome K, Lindroos AJ, Graf Pannatier E. *Part XI: Soil Solution Collection and Analysis. Manual on methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forests*. Eberswalde, Germany: Thünen Institute of Forest Ecosystems, 2016.
- [6] Liu L, Song CY, Li FS. Release of Si, Al and Fe in red soil under simulated acid rain. *Huan Jing Ke Xue*. 2007;28(10):76–82.

- [7] Dauval'ter VA, Sandimirov SS, Denisov DB, Dauvalter MV, Slukovskii ZI. Ecological and geochemical assessment of snow cover in the area affected by the apatite–nepheline production of the Kola Peninsula. *Geohimiya*. 2023;68(12):1312–1328. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0016752523120026> EDN: LYMRSB
Даувальтер В.А., Сандимиров С.С., Денисов Д.Б., Даувальтер М.В., Слуковский З.И. Эколого-геохимическая оценка снежного покрова в районе воздействия апатит-нефелинового производства Кольского полуострова // *Геохимия*. 2023. Т. 68. № 12. С. 1312–1328. <https://doi.org/10.31857/S0016752523120026> EDN: LYMRSB
- [8] Davydova ND. Formation of the chemical composition of water bodies in the South Minusinsk basin under atmospheric pollution. *Advances in Current Natural Sciences*. 2017;(12):134–139. (In Russ.). EDN: YMIMDB
Давыдова Н.Д. Формирование химического состава водных объектов Южно-Минусинской котловины в условиях атмосферного загрязнения // *Успехи современного естествознания*. 2017. № 12. С. 134–139. EDN: YMIMDB
- [9] De Schrijver An, Geudens G, Augusto L, Staelens J, Mertens Ja, Wuyts K, Gielis L, Verheyen K. The effect of forest type on throughfall deposition and seepage flux: a review. *Oecologia*. 2007;153(3):63–74. <https://doi.org/10.1007/s00442-007-0776-1> EDN: EOSLTW
- [10] Garmo ØA, Skjelkvåle BL, de Wit HD, Colombo L, Curtis Ch., Fölster J., Hoffmann A, Hruška J, Høgåsen T, Jeffries DS, Keller WB, Krám P, Majer V, Monteith DT, Pater-son AM, Rogora M, Rzychon D, Steingruber S, Stoddard JL, Vuorenmaa Ju, Worsztyno-wicz A. Trends in surface water chemistry in acidified areas in Europe and North Ameri-ca from 1990 to 2008. *Water, Air, Soil Pollution*. 2014:1–14. EDN: TWQITY
- [11] Kvaeven B, Ulstein MJ, Skjelkvåle BL, Raddum GG, Hovind H. ICP Waters—an inter-national programme for surface water monitoring. *Water, Air, & Soil Pollution*. 2001;(130):775–780. EDN: ASOOKX
- [12] Nedogarko IV, editor. *Valday lakes (review of observation results for 1946–2018). Monograph*. St. Petersburg: RIAL Publ.; 2021. (In Russ.). EDN: NBAKPY
Валдайские озёра (обзор результатов наблюдений за 1946–2018 гг.) : монография / ред. И.В. Недогарко. Санкт-Петербург : РИАЛ, 2021. 241 с. EDN: NBAKPY
- [13] Barańkiewicz D, Siepak J. Chromium, nickel and cobalt in environmental samples and existing legal norms. *Polish Journal of Environmental Studies*. 1999;8(4):201–208.
- [14] Mandal LN., Mitra RR. Transformation of iron and manganese in rice soils under differ-ent moisture regimes and organic matter applications. *Plant and Soil*. 1982;(69):45–56. <https://doi.org/10.1007/bf02185702> EDN: RKLEMX
- [15] Kabata-Pendias A, Pendias H. *Microelements in soils and plants*. Moscow: Mir Publ.; 1989. 439 p. (In Russ.).
Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях. Москва : Мир, 1989. 439 с.
- [16] Hodgson JF, Geering HR, Norvell WA. Micronutrient cation complexes in soil solution. *Soil Science Society of America Proceedings*. 1965;29(1);73–116. <https://doi.org/10.2136/sssaj1965.03615995002900060022x>
- [17] Chytrý M, Danihelka J, Ermakov N, Hájek M, Hájková P, Kočí M. Plant species richness in continental Southern Siberia: effects of pH and climate in the context of the species pool hypothesis. *Global Ecology and Biogeography*. 2007;16(5):668–678. <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2007.00320.x> EDN: LKTMFR
- [18] Boguta P, Sokolowska Z. 2016. Interactions of Zn (II) Ions with Humic Acids Isolated from Various Type of Soils. *Effect of pH, Zn Concentrations and Humic Acids Chemical Properties*. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0153626>

- [19] Warwick P, Hall A, Pashley V, Van der Lee J, Maes A. Zinc and cadmium mobility in podzol soils. *Chemosphere*. 1999;38(10):2357–2368. EDN: ACKAKR
- [20] Waller PA, Pickering WF. The lability of zinc humate species. *Chemical Speciation & Bioavailability*. 1991;3(1):9–21. <https://doi.org/10.1080/09542299.1991.11083136>

Сведения об авторах:

Дмитрий Юрьевич Баранов, младший научный сотрудник лаборатории эволюционной биогеохимии и геоэкологии, Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского, Российская Федерация, 119991, г. Москва, ул. Косыгина, д. 19. ORCID: 0000-0002-7180-4677; eLIBRARY SPIN-код: 8437-6926. E-mail: mitya.baranov.90@bk.ru

Татьяна Ивановна Моисеенко, член-корреспондент РАН, доктор биологических наук, профессор, заведующая отделом биогеохимии и экологии, Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского, Российская Федерация, 119991, г. Москва, ул. Косыгина, д. 19. ORCID: 0000-0003-2875-1693. E-mail: moiseenko.ti@gmail.com

Bio notes:

Dmitrii Yu. Baranov, junior researcher at the Laboratory of Evolutionary Biogeochemistry and Geocology, Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry, 19 Kosygina St, Moscow, 119991, Russian Federation. ORCID: 0000-0002-7180-4677; eLIBRARY SPIN-code: 8437-6926. E-mail: mitya.baranov.90@bk.ru

Tat'yana I. Moiseenko, corresponding member of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Biological Sciences, Professor, Head of the Department of Biogeochemistry and Ecology, Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry, 19 Kosygina St, Moscow, 119991, Russian Federation. ORCID: 0000-0003-2875-1693. E-mail: moiseenko.ti@gmail.com