

УДК 556.114:556.314

ОСОБЕННОСТИ ТРАНСФОРМАЦИИ СОСТАВА ПРИРОДНЫХ ВОД ПРИ ИЗМЕНЕНИИ УВЛАЖНЕННОСТИ ЛАНДШАФТОВ ВАЛДАЙСКОЙ ВОЗВЫШЕННОСТИ

© 2024 г. Д. Ю. Баранов¹*, Т. И. Моисеенко¹¹Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, Москва, Россия

*e-mail: dmitrybaranovjob@gmail.com

Поступила в редакцию 25.01.2024 г.

После доработки 30.08.2024 г.

Принята к публикации 18.10.2024 г.

Обобщены результаты 5-летних наблюдений в теплый сезон года — с середины апреля до начала ноября за химическим составом природных вод в системе атмосферные осадки — подкروновые воды — почвенные воды при смене режима атмосферных осадков на водосборе оз. Гусиное Валдайской возвышенности. Согласно гидротермическому коэффициенту увлажнения (ГТК) Селянинова было выделено 3 периода влагообеспеченности: засушливый, достаточного увлажнения и избыточного увлажнения. В статье рассмотрено распределение интенсивности выпадения атмосферных осадков в периоды между отборами проб. Установлено, что смена периодов увлажнения не влияет на гидрохимический тип атмосферных осадков и подкроновых вод (гидрокарбонатный I-го типа, по Алекину), однако преобладающий в водах катион изменяется с кальция на калий. Засушливый период характеризуется максимальными значениями минерализации в системе атмосферные осадки — подкроновые воды — почвенные воды, что обусловлено смытием большого количества пыли, накопившейся в приземном воздухе и осевшей на кронах деревьев. В период избыточного увлажнения наблюдаются самые низкие значения минерализации атмосферных осадков и подкроновых вод (6.2 и 8.3 мг/л соответственно). При смене засушливого периода избыточно увлажненным значение рН атмосферных осадков снижается, а окислительно-восстановительный потенциал увеличивается. На изменение значений рН почвенных вод оказывает содержание органических кислот (коэффициент корреляции = 0.8). Выявлено, что в засушливый период и период избыточного увлажнения поступление кальция в почвенные воды, главным образом, определяет биотический фактор, как и поступление калия в подсистеме подкроновые воды — почвенные воды.

Ключевые слова: водный режим, засушливый период, период избыточного увлажнения, гидротермический коэффициент увлажнения, атмосферные осадки, подкроновые воды, почвенные воды, Валдайская возвышенность

DOI: 10.31857/S2587556624060031, EDN: AKNNLI

ВВЕДЕНИЕ

Растущая с каждым днем антропогенная деятельность может привести к увеличению выбросов парниковых газов, повышению температуры воздуха, а также к изменению глобальных циркуляционных процессов, преобразованию режима выпадений атмосферных осадков с возможным увеличением засушливых периодов в некоторых районах (Varallyay, 2010). Подобные преобразования атмосферных выпадений отражаются на развитии геосистем, влияют на процессы почвообразования и изменяют свойства и функции почв.

В контексте изменения климата водный режим является одним из ключевых факторов, влияющих на изменение устойчивости почвен-

ных агрегатов и химического состава почвенных вод (Kelishadi et al., 2018). Для пополнения запасов почвенной влаги важна не только сумма осадков, но и их распределение во времени. В условиях длительных засушливых периодов почвенный профиль иссушается и снижается эвапотранспирация (Gombos et al., 2019).

Изменение режима выпадения атмосферных осадков, вызванное изменениями климата, может иметь последствия для экосистем (изменение состава и массы микробного сообщества, соотношение бактерий и грибов и др.) вследствие того, что поступление атмосферной влаги контролирует биологические процессы в почвенном профиле и на его поверхности, влияя на биогеохимические циклы элементов (Nielsen and Ball, 2014). Так, (Johnson et al., 2012) указы-

вают, что удлинение засушливых периодов может вызвать нарушения в биогеохимическом круговороте углерода.

Водная фаза почв является наиболее чувствительной и быстрореагирующей средой на температурные изменения экосистем. Температура, главным образом, влияет на скорости внутрипочвенных химических реакций и на интенсивность протекания процессов сорбции и десорбции растворенных веществ, *поэтому информация о температурном режиме оказывается актуальной при исследовании почвенных вод.* В исследованиях (Chen et al., 2017) отмечалось, что температура почв и почвенной влаги изменяет скорость разложения и минерализации органических веществ.

В настоящее время большая часть исследований направлена на изучение гидрофизических вопросов инфильтрации атмосферной влаги в почвенные горизонты в зависимости от режима выпадения атмосферных осадков, однако исследований, направленных на выявление особенностей изменения химического состава мигрирующей влаги недостаточно, особенно на фоновых территориях (Tripolskaja and Kazlauskaite-Jadzevi, 2022).

Целью работы является выявление биогеохимических особенностей в системе атмосферные осадки—подкروновые воды—почвенные воды на Валдайской возвышенности при изменении водного режима теплого периода года.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Экспериментальный участок располагался в 20 км северо-западнее г. Валдай, на водосборе оз. Гусиное (рис. 1) и был оборудован лизиметрическими установками для сбора почвенных вод и осадкосборниками. В пределах экспериментального участка распространены дерново-подзолы со следующим строением верхней части профиля: подстилка (O) мощностью до 5 см, бурая, стратифицирована, с присутствием растительных остатков разной степени разложения; серогумусовый горизонт (AY) мощностью от 3 до 8 см, буровато-серый, супесчаный, комковатый, пронизан корнями; подзолистый горизонт (E) мощностью от 5 до 9 см белесовато-светло-серый, супесчаный, с неровной границей, комковатый. Следы оглеения отсутствуют, ввиду хорошей дренированности изучаемого участка (Классификация ..., 2004). Почвы сформированы на четвертичных отложениях, которые представлены разнозернистыми желтовато-бурыми флювиогляциальными песками, галечниками и гравием. Четвертичные отложения перекрывают нижнекарбоневые образования. Водно-ледниковый аккумулятивный рельеф исследуемого участка представлен камовыми образованиями (Геоморфология ..., 1969).

Растительность представлена 110-летним сосняком черничным свежим, древостой характеризуется составом 5С3Е1Б1Ос, подлесок редкий состоит из *Rhamnus frangula* и *Sorbus aucuparia*. В травяно-кустарничковом ярусе, с общим проективным покрытием 60–70%, преобладает *Vaccinium myrtillus*.

Лизиметры створчатого типа были установлены на нижней границе оподзоленного слоя почвы на глубине от 17 до 20 см. Пробы лизиметрических вод являлись гравитационными водами из-под ненарушенного почвенного слоя. Принимающая емкость лизиметрической установки объемом 2 л была оснащена инертным фильтром. Фильтрат почвенных вод откачивался вакуумным насосом через выводящую трубку. Емкости для сбора проб атмосферных осадков представляли собой термохимически инертные бутылки (Vitlab, Германия) объемом 5 л с прикрепленной к горловине воронкой диаметром 25 см. Осадкосборники были установлены на высоте 2 м от поверхности земли на открытых участках с минимальным количеством растительности и в лесной зоне — под кронами сосен.

Исследования проводили с 2015 по 2019 г. в период положительных температур воздуха и жидких выпадений атмосферных осадков, начиная с середины апреля и заканчивая нача-

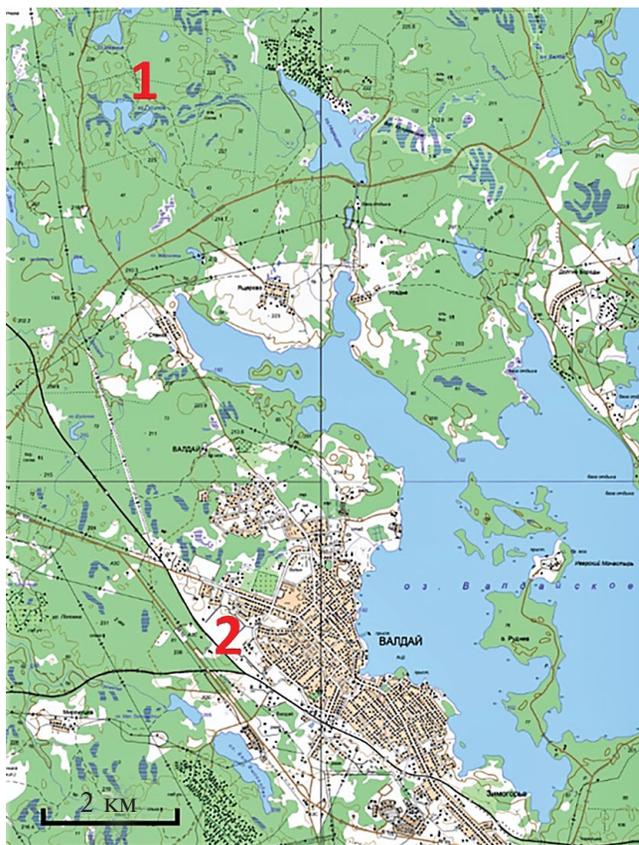


Рис. 1. Расположение экспериментальной площадки: 1 — оз. Гусиное; 2 — г. Валдай.

лом ноября. Всего было отобрано 106 образцов природных вод; количество проб атмосферных осадков — 35; подкрановых вод — 28; почвенных вод — 43. Пробы атмосферных осадков и лизиметрических вод систематически отбирали весной, летом и осенью в среднем один раз в 1.5 месяца.

Увлажненность ландшафтов атмосферными осадками оценивали по гидротермическому коэффициенту увлажнения (ГТК) Селянинова (Селянинов, 1928):

$$\text{ГТЛ} = \frac{10R}{\sum T},$$

где R — сумма осадков в миллиметрах за период с температурами выше $+10^{\circ}\text{C}$, $\sum T$ — сумма средних суточных температур ($^{\circ}\text{C}$) за тот же период.

При проведении исследования было выделено три диапазона увлажнения, что соответствовало: а) засушливому периоду ($\text{ГТК} < 1$); периоду достаточного увлажнения ($1 < \text{ГТК} < 1.3$); периоду избыточного увлажнения ($\text{ГТК} > 1.3$).

Пробоотбор природных вод осуществляли согласно методике (Eaton et al., 1992). Осадко-сборники и лизиметрические установки были оснащены инертными сеточками ($d = 10^{-5}$ м) и инертным фильтром (стеклярус), для предотвращения попадания крупной взвеси в приемную бутылку.

Измерение рН, Eh, электропроводности, $T^{\circ}\text{C}$ (приборы MettlerTolledo) проводили в полевых условиях на месте отбора проб. Пробы для всех аналитических работ фильтровали через фильтры “Merck (Millipore)” с размером пор 0.45 мкм. Перманганатную окисляемость определяли титриметрическим методом, данный показатель характеризует количество органических кислот в исследуемых объектах (Берникова и др., 2013). Катионно-анионный состав (Ca^{2+} , Na^{+} , K^{+} , SO_4^{2-} , HCO_3^{-} ; Cl^{-}) измерялся с помощью ионного хроматографа Dionex ICS-6000EG (ГЕОХИ РАН), а также спектрофотометрическими методами сразу после отбора проб в лаборатории Валдайского филиала Государственного гидрологического института (ГГИ). Концентрации Al, Fe, Si, Mn определяли методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (МС ИСП) в Институте геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского (ГЕОХИ РАН). Для статистической обработки массива данных химического состава природных вод был применен корреляционный анализ с использованием программы Statsoft Statistica 10.0.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В течение периода наблюдений в 2015 г. выпало 223 мм атмосферных осадков; в 2016 г. — 426 мм; в 2017 г. — 518 мм; в 2018 г. — 282 мм;

в 2019 г. — 792 мм. Количество осадков, выпадающих на территорию исследования в период между отборами проб, варьировало от 17.2 до 337.1 мм, время между отборами проб — от 26 до 90 сут, а средняя температура воздуха составляла от 6.1 до 21.5 $^{\circ}\text{C}$, значение ГТК от 0.3 до 2.6 (табл. 1). Максимальным значениям ГТК (2.4, 2.6) соответствует наименьшее количество суток без осадков. В основном, для засушливого периода и периода достаточного увлажнения между отборами проб наблюдались неинтенсивные (менее 3 мм/сут) выпадения атмосферных осадков. Для периодов избыточного увлажнения характерно сокращение числа дней без выпадения осадков. Умеренные осадки способствуют более равномерному промыванию приземного слоя атмосферы и просачиванию воды сквозь почвенный профиль.

Исследуемые природные воды классифицировали по Алекину (1970). Тип вод и минерализация широко варьировали по преобладающим катионам и анионам (табл. 2, рис. 2). В период избыточного увлажнения средние значения минерализации увеличивались в ряду атмосферные осадки — подкрановые воды — почвенные воды. Однако по сравнению с менее обводненными периодами, при избыточном увлажнении регистрируются наиболее низкие средние значения минерализации — в диапазоне от 6.2 до 10.6 мг/л в атмосферных осадках и почвенных водах соответственно. Для засушливого периода и периода достаточного увлажнения максимальные средние значения минерализации характерны для подкрановых вод (25.6 и 15.0 мг/л соответственно). При этом средние значения минерализации в засушливый период в системе атмосферные осадки — подкрановые воды — почвенные воды значительно выше, чем в период достаточного увлажнения, и изменяются в диапазоне от 7.6 до 11.8 мг/л. Несмотря на значительное различие минерализации по периодам, полученные результаты не превышают фоновых значений (30 мг/л), характерных для региональных станций наблюдений в европейской части России (Еремина, 2019; Котова, 2012). При смене засушливого периода более влажным наблюдается резкое снижение минерализации атмосферных осадков, подкрановых и почвенных вод. Наибольший скачок снижения минерализации характерен для подкрановых вод, а наименьший — для почвенных вод. Выявленные изменения минерализации в атмосферных осадках и подкрановых водах обусловлена накоплением пыли в приземном слое атмосферы и на кронах деревьев в засушливый период. Подкрановые воды обогащаются основными ионами не только за счет смыва пыли, но и вследствие более активной жизнедеятельности биоты, а также при насыщении растений и других организмов

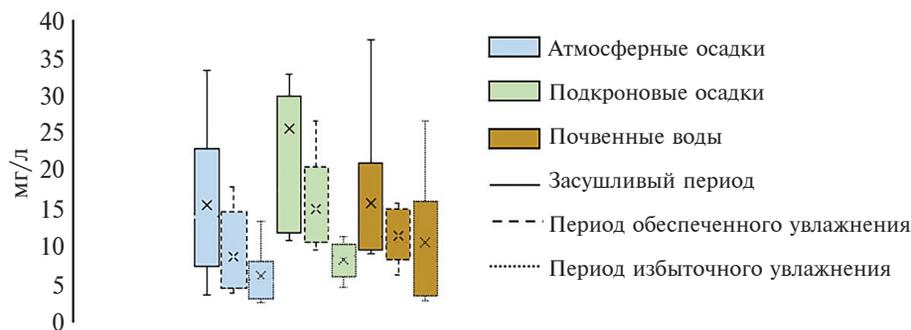
Таблица 1. Гидроклиматические характеристики периодов между отборами проб

Дата начала (сбора) серии измерений	Дата отбора проб	Количество осадков, мм	Средняя температура воздуха за период, °С	ГТК Селянинова
09.06.2015	07.07.2015	19.8	20.3	0.4
07.07.2015	03.08.2015	94.3	18.6	1.9
03.08.2015	30.08.2015	18.3	21.5	0.3
30.08.2015	28.09.2015	73.1	16.8	1.3
28.09.2015	19.10.2015	17.2	7.7	0.9
20.04.2016	06.06.2016	34.6	18.1	0.5
06.06.2016	27.07.2016	214	21.2	1.8
27.07.2016	29.09.2016	110.8	17.7	0.8
29.09.2016	22.10.2016	43.4	6.1	1.6
04.05.2017	28.06.2017	113.6	13.9	1.1
28.06.2017	27.08.2017	291.1	19.9	2.4
27.08.2017	20.10.2017	113.6	11.7	1.2
07.05.2018	25.06.2018	73.6	18.7	0.5
25.06.2018	24.09.2018	208.7	20.6	1.1
26.04.2019	09.07.2019	225.6	18.7	1.3
09.07.2019	27.08.2019	229.7	18.2	2.6
27.08.2019	09.11.2019	337.1	10.1	1.8

Таблица 2. Тип и средние значения минерализации атмосферных осадков, подкроновых и почвенных вод

Объект	ГТК Селянинова					
	Диапазон увлажнения <1		Диапазон увлажнения 1–1.3		Диапазон увлажнения >1.3	
	Тип воды	Минерализация, мг/л	Тип воды	Минерализация, мг/л	Тип воды	Минерализация, мг/л
Атмосферные осадки	C_{Ca}^I	20.5	C_{Ca}^I	8.7	C_{Ca}^I	6.2
Подкроновые воды	C_K^I	25.6	C_K^I	15.0	C_K^I	8.3
Почвенные воды	S_K^I	19.1	C_{Ca}^I	11.5	S_{Ca}^I	10.6

Источник: (Алекин, 1970).

**Рис. 2.** Минерализация атмосферных осадков, подкроновых и почвенных вод в периоды с разным гидротермическим коэффициентом увлажнения.

Примечание. Крестик — средние значения. На оси абсцисс расположены изучаемые объекты в соответствующий период увлажненности; на оси ординат отображено значение минерализации (мг/л).

продуктами метаболизма (Демаков, Исаев, 2015; Учватов, 2009; Vadassery et al., 2012). Поскольку в условиях засушливого режима накапливается значительное количество пыли на кронах деревьев, а согласно исследованиям (Turner and van Broekhuizen, 1992) вымывание элементов растёт при увеличении времени взаимодействия осадков с хвоей, можно предположить, что в условиях засушливого периода среди процессов, определяющих поступление элементов с атмосферными осадками, преобладает смыв пыли с крон.

Снижение минерализации почвенных вод в засушливый период и период достаточного увлажнения по сравнению с периодом избыточного увлажнения указывает на преобладающие процессы сорбции и активного потребления элементов микроорганизмами и корнями растений. При смене засушливого периода избыточно увлажненным наблюдается не только резкое снижение минерализации, но и смена преобладающего катиона (калия на кальций), что вероятно, обусловлено преобладанием растворимых форм кальция в обменно-поглощающем комплексе почв. Для увлажненного периода характерно более интенсивное вымывание кальция из почвы (Шильников и др., 1989; Neilsen and Stevenson, 1983). Стоит отметить, что тип вод атмосферных осадков и подкрановых вод остается неизменным (гидрокарбонатным I-го типа) при смене степени увлажненности. Различие по преобладающему катиону обусловлено более высокой биофильностью калия в лесном ландшафте (Орлов, Безуглова, 2000).

Изменение основных параметров атмосферных, подкрановых и почвенных вод рассматривалось относительно количества выпадающих дождей. На состав атмосферных осадков перво-степенное влияние оказывает частота выпадений, чем длиннее будет период засухи, тем больше пыли может накопиться в приземном слое атмосферы, которая может существенно обогатить дождевые воды открытых участков (Duce and Hoffman, 1976). При контакте атмосферных осадков с пологом леса, в первую очередь происходит задержка влаги, при слабом испарении влага взаимодействует с кронами деревьев и может попасть на поверхность и вглубь почвы, тем самым трансформируясь в почвенные воды (Петров и др., 1988; Учватов, 1985). От режима выпадения осадков и температуры зависит время взаимодействия атмосферных осадков с кронами деревьев, интенсивность испарения или конденсации влаги, что в конечном счете влияет на состав почвенных вод, который, главным образом, зависит от времени взаимодействия атмосферных осадков и почвенного субстрата. Содержание основных катионов, анионов и зна-

чений pH, Eh сильно варьируют в атмосферных осадках, подкрановых и почвенных водах.

Атмосферные осадки. Засушливый период характеризуется нейтральными и слабощелочными значениями pH атмосферных осадков, что связано с достаточно малым поступлением органических кислот (коэффициент корреляции Спирмена между значением pH и содержанием органических кислот $r = 0.8$). По мере увеличения количества атмосферных осадков их pH снижается, а количество органических кислот возрастает, что, вероятно, происходит из-за более интенсивного удаления углекислого газа атмосферными осадками. Однонаправленная динамика наблюдается для содержания основных катионов и анионов: при переходе от засушливого периода к периоду достаточного увлажнения средние концентрации Ca^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- резко снижаются. По мере возрастания количества атмосферных осадков значения Eh увеличиваются. Вероятно, рост значения редокс-потенциала происходит из-за увеличения содержания растворенного кислорода в атмосферных осадках, вследствие этого доля окисленных и малорастворимых соединений элементов возрастает.

Подкрановые воды. Так же как в атмосферных осадках, средние концентрации Ca^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , Al^{3+} , Fe^{3+} , Mn^{2+} резко снижаются при смене засушливого периода увлажненным (табл. 3). Исключение — изменение содержания гидрокарбонат-ионов, вероятно, это наблюдается из-за того, что в условиях задержки атмосферных осадков кронами деревьев и умеренного распределения влаги биотический привнос анионов преобладает над геохимическим (Vanguelova, 2009). Максимальные средние значения показателей в период достаточного увлажнения отмечаются для гидрокарбонат-ионов, а минимальные — для содержания органических кислот и значений Eh.

Почвенные воды. Минимальные средние значения pH, Eh, содержания Na, органических кислот и SO_4^{2-} наблюдаются в период достаточного увлажнения, что подтверждается исследованиями Кравченко (2016). Максимальные средние концентрации наблюдаются для HCO_3^- , Mn^{2+} , Fe^{2+} и Al^{3+} . Если максимальные содержания гидрокарбонат-ионов, вероятно, унаследованы от подкрановых вод, то максимальным концентрациям Mn^{2+} , Fe^{2+} соответствуют минимальные значения окислительно-восстановительного потенциала. Похожее поведение элементов рассматривается в (Popenda, 2014), где основное воздействие на скорость миграции катионов оказывает показатель редокс-потенциала.

Постепенное снижение среднего содержания при смене засушливого периода избыточно увлажненным характерно для Ca^{2+} , K^+ , Cl^- .

Таблица 3. Катионно-анионный состав атмосферных осадков, подкروновых и почвенных вод при изменении водного режима

Тип природных вод	Водный режим	pH	Eh, мВ	COD Mn, мгО/л	Ca, мкг/л	Na, мкг/л	K, мкг/л	Cl, мкг/л	SO ₄ ²⁻ , мкг/л	HCO ₃ ⁻ , мкг/л	Al, мкг/л	Fe, мкг/л	Mn, мкг/л
Атмосферные осадки	засушливый период	7.1/(6.3–8.6)	192/(138–240)	2.4/(2.0–5.6)	1729/(624–3326)	1720/(196–4800)	1500/(96–4644)	1740/(365–4500)	5800/(660–15500)	6900/(960–21000)	19.6/(4.7–39)	14.4/(6.8–25.5)	9.8/(4.1–21.7)
	период достаточного увлажнения	6.6/(5.6–7.4)	200/(178–233)	6.1/(2.2–12)	887/(306–1562)	161/(86–269)	384/(127–863)	692/(110–1500)	1275/(830–2000)	5100/(750–12600)	15.8/(5.8–38)	12.3/(3.5–31)	6.9/(4.8–10.2)
	период избыточного увлажнения	6.4/(5.4–7.3)	214/(144–274)	18.2/(1.8–57.6)	505/(1811–796)	208/(65–358)	221/(67–633)	285/(105–526)	651/(320–1300)	4140/(1200–9960)	8.9/(0.8–14.2)	9.3/(3.2–17.3)	4/(2.30–6.2)
Подкروновые воды	засушливый период	5.8/(5.0–6.6)	271/(198–333)	50/(20–96)	2551/(1011–6062)	2059/(113–8466)	5644/(1091–21074)	2644/(250–7650)	5533/(1550–18500)	6300/(600–12000)	138/(28–544)	46/(13–99)	200/(97–329)
	период достаточного увлажнения	5.5/(4.5–6.1)	223/(192–240)	38.6/(15.5–76)	992/(746–1263)	245/(187–354)	2204/(1767–2968)	1211/(265–2500)	1523/(1110–2300)	8154/(3120–21600)	37.8/(30.2–44.3)	20.5/(3.3–31.2)	185/(105–236)
	период избыточного увлажнения	5.5/(4.3–7.0)	280/(215–390)	45/(10.4–108)	646/(411–1030)	248/(123–441)	1221/(733–1627)	464/(310–563)	1170/(600–2000)	4060/(1200–7200)	36/(21–75)	16.8/(2.1–35.5)	98/(65–120)
Почвенные воды	засушливый период	4.9/(3.5–7.0)	276/(215–318)	67/(36–88)	1847/(1260–3660)	1090/(255–3727)	4886/(552–18700)	2774/(750–7890)	3295/(1000–7560)	3280/(100–8400)	1318/(1030–1552)	351/(227–437)	365/(259–529)
	период достаточного увлажнения	4.5/(3.4–5.8)	212/(98–260)	77/(43–108)	1429/(1018–2035)	449/(229–949)	1140/(152–2501)	1669/(340–3040)	1955/(1627–2900)	3492/(50–10800)	1670/(1054–2260)	406/(281–475)	433/(219–797)
	период избыточного увлажнения	4.7/(3.5–6.2)	284/(210–382)	126/(40–333)	1411/(664–3546)	972/(214–3663)	717/(90–2233)	962/(180–2625)	3211/(900–11400)	570/(10–6000)	1282/(256–1718)	351/(189–481)	211/(59–328)

Примечание. В числителе — средние значения, в знаменателе — диапазон от минимального значения концентрации до максимального; COD Mn — перманганатная окисляемость.

В условиях засушливого периода средние концентрации Al^{3+} , Fe^{2+} , Mn^{2+} увеличиваются в ряду атмосферные осадки — подкроновые воды — почвенные воды, что, вероятно, связано с возрастающим содержанием органических кислот в системе (Starr et al., 1985). Независимо от смены условий влагообеспеченности значения pH снижаются в системе атмосферные осадки — подкроновые воды — почвенные воды, а содержание органических кислот увеличивается, связь этих параметров подтверждается значимым обратным коэффициентом корреляции ($r = -0.71$), что типично для природных вод южнотаежных ландшафтов хвойной бореальной зоны (Первова, Евдокимова, 1984).

Максимальные средние концентрации хлорид-ионов в атмосферных осадках и подкроновых водах в засушливый период, вероятно, являются следствием более интенсивного испарения влаги. Содержание Cl^- независимо от водного режима увеличивается в системе атмосферные осадки — подкроновые воды — почвенные воды, что связано с высокой миграционной способностью элемента в водной среде (Лукина, Никонов, 2004). При контакте атмосферных осадков и подкроновых вод с поверхностью почвы происходит кардинальное изменение условий для формирования почвенных вод. В табл. 4 отражены результаты корреляционного анализа, который использовался для связи каждой из исследованных переменных в химическом составе атмосферных осадков, подкроновых и почвенных вод.

Согласно данным корреляционного анализа выявлялись достоверные сходства химического состава атмосферных осадков, подкроновых и почвенных вод относительно периодов увлажненности.

Засушливый период. Значимая корреляционная связь ($p \leq 0.05$) ионов натрия, хлора и сульфатов сохраняется во всей исследуемой системе атмосферные осадки — подкроновые воды — почвенные воды, что может быть связано с единым (атмосферным) источником поступления ионов (см. табл. 4). Значимой корреляции содержания ионов калия и кальция в подкроновых водах и атмосферных осадках выявлено не было, а в подсистеме подкроновые воды — почвенными воды отмечается высокая корреляция ($r > 0.88$), что может указывать на преимущественно биогенное поступление катионов.

Период достаточного увлажнения. Высокая корреляционная связь, выявленная для ионов кальция и железа в подсистеме атмосферные осадки — подкроновые воды, сменяется незначимой в подсистеме подкроновые воды — почвенные воды, что указывает на различный источник поступления элементов в почвенных водах и атмосферных осадках. Если поступление ионов кальция и железа в атмосферные осадки и подкроновые воды, вероятно, связано с глобальным и региональным переносом аэрозолей, происхождение которых обусловлено выветриванием почвенных минералов (Ganor et al., 1991; Migliavacca et al., 2005), то в почвенные воды поступление катионов обусловлено, главным образом, выщелачиванием из почвенных горизонтов. Значимая положительная корреляция выявлена среди анионов подкроновых и почвенных вод.

Период избыточного увлажнения. Между атмосферными осадками и подкроновыми водами выявлена обратная значимая корреляция для марганца и железа, что, вероятно, связано со сменой источника поступления элементов: если в атмосферные осадки привнос металлов обусловлен выветриванием почвенных минералов, то в подкроновые воды более значимым стано-

Таблица 4. Коэффициент корреляции между компонентами химического состава в атмосферных осадках, подкроновых и почвенных водах

Водный режим	Объект изучения	Ca	Na	K	Al	Fe	Mn	Cl	SO ₄	HCO ₃
Засушливый период	атмосферные осадки/подкроновые воды	0.63	0.89	-0.09	0.78	0.43	-0.21	0.71	0.92	0.65
	подкроновые воды/почвенные воды	0.88	0.91	0.91	-0.65	-0.34	0.87	0.90	0.83	-0.55
Период достаточного увлажнения	атмосферные осадки/подкроновые воды	0.68	0.59	0.76	0.33	0.87	0.12	0.62	-0.60	-0.29
	подкроновые воды/почвенные воды	0.09	0.76	0.62	-0.53	-0.18	0.15	0.90	0.89	0.92
Период избыточного увлажнения	атмосферные осадки/подкроновые воды	0.83	0.81	0.04	0.30	-0.93	-0.92	-0.48	-0.66	0.35
	подкроновые воды/почвенные воды	0.90	0.72	0.67	0.25	0.20	-0.72	0.22	0.68	0.73

вится влияние биотического фактора (Eludoyin and Ibitoye, 2018). Как и для засушливого периода высокая положительная корреляция сохраняется для ионов натрия и кальция в системе атмосферные осадки — подкроновые воды — почвенные воды, что указывает на схожесть поведения элементов при различных водных режимах.

Таким образом, можно предположить, что поступление кальция в почвенные воды в период достаточного увлажнения, в основном, обусловлено выщелачиванием из почвенных минералов за счет более длительного взаимодействия атмосферных осадков с почвами. Тогда как в другие периоды (избыточного и засушливого увлажнения) определяющую роль в поступлении кальция в почвенные воды играет биотический фактор. Также поведение калия сходно в засушливый период и период избыточного увлажнения. В подсистеме атмосферные осадки — подкроновые воды для калия не было выявлено значимой корреляции, в подсистеме подкроновые воды — почвенные воды отмечалась высокая положительная корреляция, что говорит о преимущественно биогенном генезисе катиона.

ВЫВОДЫ

В течение засушливого периода наблюдаются максимальные значения минерализации в атмосферных осадках и подкроновых водах (20.5 и 25.6 мг/л соответственно), вследствие вымывания накопленной пыли из приземного слоя атмосферы и с крон деревьев. Смена преобладающего катиона (кальция на калий) отражает смену преобладания геохимических условий на биотические. Максимальные значения минерализации в рассматриваемой системе природных вод характерны для подкроновых вод, что происходит не только за счет смыва пыли, но и вследствие более активного влияния биоты. Смена гидрокарбонатного типа почвенных вод на гидрокарбонатно-сульфатный в засушливых условиях указывает на преобладающие процессы сорбции, потребления элементов микроорганизмами и корнями растений в почвенных водах.

Кислотность природных вод не зависит от условий влагообеспеченности и, главным образом, определяется содержанием органических кислот в системе атмосферные осадки — подкроновые воды — почвенные воды ($r = 0.8$). Содержание основных ионов резко снижается при смене засушливого периода избыточно увлажненным. В условиях засушливого периода миграционные свойства железа и марганца определяет изменение окислительно-восстановительной обстановки, которое меняет валентность элемента при трансформации атмосферных осадков в почвенные воды. Период избыточной увлажненности характеризуется резкой сменой кислотно-щелочного

состояния (значения pH варьируют от 4.3 до 7.3), в которой наиболее контрастные изменения концентраций выявлены для Al.

На основе корреляционного анализа, который определяет связь каждой переменной химического состава атмосферных осадков, подкроновых и почвенных вод, установлено, что на поступление ионов кальция в почвенные воды в период избыточного увлажнения и в засушливый, ключевую роль оказывает биогенный фактор. В период достаточного увлажнения поступление ионов кальция и железа в атмосферные осадки и подкроновые воды, вероятно, связано с глобальным и региональным переносом аэрозолей, происхождение которых обусловлено выветриванием почвенных минералов, а в почвенные воды поступление катионов обусловлено, главным образом, выщелачиванием из почвенных горизонтов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 22-17-00061.

FUNDING

The work was carried out with financial support from the Russian Science Foundation grant no. 22-17-00061.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алекин О.А. Основы гидрохимии. Л.: Гидрометеоздат, 1970. 444 с.
- Берникова Т.А., Нагорнова Н.Н., Цупикова Н.А. Возможность оценки трофического статуса водоема по величине перманганатной окисляемости (на примере озера Виштынецкого Калининградской области) // Вестн. РУДН. Сер. Экология и безопасность жизнедеятельности. 2013. № 3. С. 12–21.
- Геоморфология и четвертичные отложения Северо-Запада европейской части СССР (Ленинградская, Псковская и Новгородская области) / ред. Д.Б. Малаховский, К.К. Марков. Л.: Наука, 1969. 256 с.
- Демаков Ю.П., Исаев А.В. Влияние аэрального поступления веществ на их круговорот в лесных экосистемах // Вестн. ПГТУ. 2015. Т. 1. № 25. С. 66–86.
- Еремينا И.Д. Химический состав атмосферных осадков в Москве и тенденции его многолетних изменений // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2019. № 3. С. 3–10.
- Классификация и диагностика почв России / отв. ред. Г.В. Добровольский. Смоленск: Ойкумена, 2004, 342 с.
- Кравченко И.Ю. Химический состав почвенных вод хвойных лесов средней тайги Карелии: матер. научно-практич. конф. “Биодиагностика состояния природных и природно-техногенных систем”. Петрозаводск, 2016. 335 с.

- Котова Е.И.* Формирование химического состава осадков на севере европейской территории России // Вестн. Северного (Арктического) фед. ун-та. Сер. Естественные науки. 2012. № 4. С. 116–122.
- Орлов А.С., Безуглова О.С.* Биогеохимия. Ростов-на-Дону: “Феникс”, 2020. 320 с.
- Петров Е.Г., Бережная Л.И., Качановский И.М., Короткевич Н.А.* Экологический режим в сосновых биогеоценозах. Минск: Наука и техника, 1998. 160 с.
- Первова Н.Е., Евдокимова Т.И.* Состав почвенных растворов в подзоне южной тайги // Почвоведение. 1984. № 1. С. 7–15.
- Селянинов Г.Т.* О сельскохозяйственной оценке климата // Тр. по сельскохозяйственной метеорологии. 1928. Вып. 20. С. 165–177.
- Учватов В.П.* Особенности почвенных и грунтовых вод Приокской зандрово-аллювиальной равнины // Почвоведение. 1985. № 6. С. 55–65.
- Учватов В.П.* Ландшафтно-эколого-геохимические показатели природных фоновых процессов // Мелиорация и рекультивация, экология. 2009. № 2. С. 5–15.
- Al-Khashman O.A.* Ionic composition of wet precipitation in the Petra region, Jordan // Atmos. Res. 2005. № 78. P. 1–12.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2005.02.003>
- Assouline S., Mualem Y.* Effect of Rainfall-Induced Soil Seals on the Soil Water Regime: Drying Interval and Subsequent Wetting // Transport in Porous Media. 2003. № 53. P. 75–94.
<https://doi.org/10.1023/A:1023583808812>
- Buchan G.D.* Soil temperature regime. In: Soil and Environmental Analysis: Physical Methods / K.A. Smith, C.E. Mullins (Eds.). NY: Marcel Dekker, 2001. P. 539–594.
<https://doi.org/10.1201/9780203908600>
- Chen J., Xiao G., Kuzyakov Ya., Jenerette G.D., Ma Y., Liu W., Wang Z., Shen W.* Soil nitrogen transformation responses to seasonal precipitation changes are regulated by changes in functional microbial abundance in a subtropical forest // Biogeosciences. 2014. № 14. P. 2513–2525.
<https://doi.org/10.5194/bg-14-2513-2017>
- Duce R.A., Hoffman E.J.* Chemical fractionation at the air/sea interface // Annual Review of Earth and Planetary Sci. 1976. № 4. P. 187–228.
<https://doi.org/10.1146/annurev.ea.04.050176.001155>
- Eludoyin A.O., Ibitoye M.O.* Relationship between precipitation and soil water chemistry in an intensively managed clayey soil environment in southwest England: a preliminary study // Int. J. of Hydrology Science and Technology. 2018. Vol. 8. № 4. P. 339–348.
<https://doi.org/10.1504/IJHST.2018.095535>
- Ganor E., Foner H.A., Brenner J., Neeman E., Lavi N.* The chemical composition of aerosols setting in Israel following dust storms // Atmos. Environ. 1991. № 25A. P. 2665–2670.
[https://doi.org/10.1016/0960-1686\(91\)90196-E](https://doi.org/10.1016/0960-1686(91)90196-E)
- Gombos M., Kandra B., Tall A., Pavelková D.* Analysis of Non-Rainfall Periods and Their Impacts on the Soil Water Regime. In: Hydrology — The Science of Water / M.S. Javaid (Ed.). In Tech Open. 2019. P. 1–19.
<https://doi.org/10.5772/intechopen.82399>
- Johnson S.L., Kuske C.R., Carney T.D., Housman D.C., Gallegos-Graves L.V., Belnap J.* Increased temperature and altered summer precipitation have differential effects on biological soil crusts in a dryland ecosystem // Global Change Biology. 2012. № 18. P. 2583–2593.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2012.02709.x>
- Kelishadi H., Mosaddeghi M.R., Ayoubi S., Mamedov A.I.* Effect of temperature on soil structural stability as characterized by high energy moisture characteristic method // Catena. 2018. Vol. 170. № 2. P. 290–304.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.06.015>
- Migliavacca D., Teixeira E.C., Wiegand F., Machado A., Sanchez J.* Atmospheric precipitation and chemical composition of an urban site, Guaiba hydrographic basin, Brazil // Atmos. Environ. 2005. № 39. P. 1829–1844.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2004.12.005>
- Neilsen G.H., Stevenson D.S.* Leaching of soil calcium, magnesium, and potassium in irrigated orchard lysimeters // Soil Science Society of America J. 1983. Vol. 47. № 4. P. 692–696.
<https://doi.org/10.2136/sssaj1983.03615995004700040018x>
- Nielsen U.N., Ball B.A.* Impacts of altered precipitation regimes on soil communities and biogeochemistry in arid and semi-arid ecosystems // Global Change Biol. 2014. № 21. P. 1407–1421.
<https://doi.org/10.1111/gcb.12789>
- Popenda A.* Effect of redox potential on heavy metals and As behavior in dredged sediments // Desalination and Water Treatment. 2014. Vol. 52. № 19–21. P. 1–10.
<https://doi.org/10.1080/19443994.2014.887449>
- Starr M.R., Lindroos A.-J., Nieminen T.M.* Variation in the quality of tension lysimeter soil water samples from a Finnish forest soil // Soil Sci. 1985. Vol. 140. № 6. P. 453–461.
<https://doi.org/10.1007/s10661-014-3963-7>
- Tripolskaja L., Kazlauskaitė-Jadzevi A.* Trend Analyses of Percolation of Atmospheric Precipitation Due to Climate Change: Case Study in Lithuania // Agronomy. 2022. Vol. 12. № 8. P. 1–15.
<https://doi.org/10.3390/agronomy12081784>
- Turner D.P., van Broekhuizen H.J.* Nutrient leaching from conifer needles in relation to foliar apoplast cation exchange capacity // Environ Pollut. 1992. Vol. 75. № 3. P. 259–63.
[https://doi.org/10.1016/0269-7491\(92\)90124-s](https://doi.org/10.1016/0269-7491(92)90124-s)
- Vadassery J., Reichelt M., Hause B., Gershenson J., Bolland W., Mithufe A.* CML42-mediated calcium signaling coordinates responses to Spodoptera herbivory

- and abiotic stresses in *Arabidopsis* // *Plant Physiol.* 2012. № 159. P. 1159–1175.
<https://doi.org/10.1104/pp.112.198150>
- Várallyay G. The impact of climate change on soils and on their water management // *Agronomy Res.* 2010. № 8. P. 385–396.
- Vanguelova E.I., Benham S., Pitman R., Durrant Houston T. Chemical fluxes in time through forest ecosystems in the UK — Soil response to pollution recovery // *Environ. Pollution.* 2009. № 158. P. 1857–1869.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2009.10.0>

Features of Transformation of the Natural Waters' Composition with Changes in the Humidity of Landscapes of the Valdai Hills

D. Yu. Baranov^{a,*} and T. I. Moiseenko^a

^a*Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry, RAS, Moscow, Russia*

**e-mail: dmitrybaranovjob@gmail.com*

The results of 5-year observations in the warm season of the year (from mid-April to early November) on the chemical composition of natural waters in the system atmospheric precipitation — undertree water — soil water during a change in the precipitation regime in the catchment area of Gusinoe Lake on the Valdai Hills are summarized. According to Selyaninov's hydrothermal moisture coefficient, three periods of moisture supply were identified: dry, sufficient hydration, and excess hydration. The article examines the distribution of precipitation intensity during the inter-sampling periods. Changing periods of moisture does not affect the type of precipitation and undertree water (hydrocarbonate type I, according to Alekin), however, the predominant cation changes from calcium to potassium. The dry period is characterized by maximum mineralization values in the system atmospheric precipitation — undertree water — soil water, which is due to the washing away of a large amount of dust accumulated in the ground air and settled on the crowns of trees. During the period of excess moisture, the lowest values of mineralization of atmospheric precipitation and sub-canopy waters are observed (6.2 and 8.3 mg/L, respectively). When the dry period is overly humidified, the pH value of atmospheric precipitation decreases, and the redox potential increases. The change in the pH values of soil waters is influenced by the content of organic acids (correlation coefficient = 0.8). It was revealed that during the dry period and the period of excessive moisture, the intake of calcium into soil waters mainly determines the biotic factor, as well as the intake of potassium in the subsystem undertree waters — soil waters.

Keywords: water regime, dry period, period of excess moisture, hydrothermal moisture coefficient, precipitation, undertree water, soil waters, Valdai Hills

REFERENCES

- Alekin O.A. *Osnovy gidrokhimii* [Fundamentals of Hydrochemistry]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1970. 444 p.
- Al-Khashman O.A. Ionic composition of wet precipitation in the Petra region, Jordan. *Atmos. Res.*, 2005, vol. 78, no. 1–2, pp. 1–12.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2005.02.003>
- Assouline S., Mualem Y. Effect of rainfall-induced soil seals on the soil water regime: drying interval and subsequent wetting. *Transp. Porous Media*, 2003, vol. 4, no. 8A, pp. 75–94.
<https://doi.org/10.1023/A:1023583808812>
- Bernikova T.A., Nagornova N.N., Tsurikova N.A. The possibility of assessing the trophic status of a reservoir by the magnitude of permanganate oxidability (on the example of Lake Vishtynetsky in the Kaliningrad region). *Vestn. RUDN*, 2013, no. 3, pp. 12–21. (In Russ.).
- Buchan G.D. Soil temperature regime. In *Soil and Environmental Analysis: Physical Methods*. Smith K.A., Mullins C.E., Eds. New York: Marcel Dekker, 2001, pp. 539–594.
<https://doi.org/10.1201/9780203908600>
- Chen J., Xiao G., Kuzyakov Ya., Jenerette G.D., Ma Y., Liu W., Wang Z., Shen W. Soil nitrogen transformation responses to seasonal precipitation changes are regulated by changes in functional microbial abundance in a subtropical forest. *Biogeosci.*, 2014, vol. 14, no. 9, pp. 2513–2525.
<https://doi.org/10.5194/bg-14-2513-2017>
- Demakov Yu.P., Isaev A.V. The effect of the aerial intake of substances on their circulation in forest ecosystems. *Vestn. PGTU*, 2015, vol. 1, no. 25, pp. 66–86. (In Russ.).
- Duce R.A., Hoffman E.J. Chemical fractionation at the air/sea interface. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 1976, vol. 4, pp. 187–228.
<https://doi.org/10.1146/annurev.ea.04.050176.001155>
- Eludoyin A.O., Ibitoye M.O. Relationship between precipitation and soil water chemistry in an intensively managed clayey soil environment in southwest England: a preliminary study. *Int. J. Hydrol. Sci. Technol.*, 2018, vol. 8, no. 4, pp. 339–348.
<https://doi.org/10.1504/IJHST.2018.095535>
- Eremina I.D. The chemical composition of atmospheric precipitation in Moscow and the trends of its long-

- term changes. *Vestn. Mosk. Univ., Ser. 5: Geogr.*, 2019, no. 3, pp. 3–10. (In Russ.).
- Ganor E., Foner H.A., Brenner J., Neeman E., Lavi N. The chemical composition of aerosols setting in Israel following dust storms. *Atmos. Environ.*, 1991, vol. 25, no. 12, pp. 2665–2670. [https://doi.org/10.1016/0960-1686\(91\)90196-E](https://doi.org/10.1016/0960-1686(91)90196-E)
- Geomorfologiya i chetvertichnye otlozheniya severo-zapada evropeiskoi chasti SSSR (Leningradskaya, Pskovskaya i Novgorodskaya oblasti)* [Geomorphology and Quaternary deposits of the North-West of European Part of the USSR (Leningrad, Pskov and Novgorod regions)]. Malakhovskii D.B., Markov K.K., Eds. Leningrad: Nauka Publ., 1969. 256 p.
- Gombos M., Kandra B., Tall A., Pavelková D. Analysis of non-rainfall periods and their impacts on the soil water regime. In *Hydrology — the Science of Water*. Javaid, M.S., Eds. Ebook, 2019, pp. 1–19. <https://doi.org/10.5772/intechopen.82399>
- Johnson S.L., Kuske C.R., Carney T.D., Housman D.C., Gallegos-Graves L.V., Belnap J. Increased temperature and altered summer precipitation have differential effects on biological soil crusts in a dryland ecosystem. *Glob. Change Biol.*, 2012, vol.18, no. 8, pp. 2583–2593. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2012.02709.x>
- Kelishadi H., Mosaddeghi M.R., Ayoubi S., Mamedov A.I. Effect of temperature on soil structural stability as characterized by high energy moisture characteristic method. *Catena*, 2018, vol. 170, no. 2, pp. 290–304. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.06.015>
- Khimicheskii sostav pochvennykh vod khvoynykh lesov srednei taigi Karelii: mater. nauch. konf.* [Chemical Composition of Soil Waters of Coniferous Forests of the Middle Taiga of Karelia. Materials of the Sci. Conf.]. Degteva S.V., Litvinets S.G., Ashichmina T.Ya., Domracheva L.I., et al., Eds. Petrozavodsk: Raduga-PRESS Publ., 2016. 447 p.
- Klassifikatsiya i diagnostika pochv Rossii* [Classification and Diagnostics of Soils in Russia]. Dobrovolskii G.V., Eds. Smolensk: Oikumena Publ., 2004. 342 p.
- Kotova E.I. Formation of the chemical composition of precipitation in the north of the European territory of Russia. *Vestn. Sever. Arktich. Fed. Univ., Ser. Estest. Nauki*, 2012, no. 4, pp. 116–122. (In Russ.).
- Migliavacca D., Teixeira E.C., Wiegand F., Machado A., Sanchez J. Atmospheric precipitation and chemical composition of an urban site, Guaíba hydrographic basin, Brazil. *Atmos. Environ.*, 2005, vol. 39, no. 10, pp. 1829–1844. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2004.12.005>
- Nielsen G.H., Stevenson D.S. Leaching of soil calcium, magnesium and potassium in irrigated orchard lysimeters. *Soil Sci.Soc. Am. J.*, 1983, vol. 47, no. 4, pp. 692–696. <https://doi.org/10.2136/sssaj1983.03615995004700040018x>
- Nielsen U.N., Ball B.A. Impacts of altered precipitation regimes on soil communities and biogeochemistry in arid and semi-arid ecosystems. *Glob. Change Biol.*, 2014, vol. 21, no. 4, pp. 1407–1421. <https://doi.org/10.1111/gcb.12789>
- Orlov A.S., Bezuglova O.S. *Biogeokhimiya* [Biogeochemistry]. Rostov-on-Don: Feniks Publ., 2020. 320 p.
- Petrov E.G., Berezhnaya L.I., Kachanovskii I.M., Korotkevich N.A. *Ekologicheskii rezhim v sosnovykh biogeotsenozakh* [Ecological Regime in Pine Biogeocenoses]. Minsk: Nauka i tekhnika Publ., 1998. 160 p.
- Pervova N.E., Evdokimova T.I. Composition of soil solutions in the subzone of the southern taiga. *Pochvoved.*, 1984, no. 1, pp. 7–15. (In Russ.).
- Popenda A. Effect of redox potential on heavy metals and As behavior in dredged sediments. *Desalin. Water Treat.*, 2014, vol. 52, no. 19–21, pp. 1–10. <http://dx.doi.org/10.1080/19443994.2014.887449>
- Selyaninov G.T. On agricultural climate assessment. *Tr. Sel'skokhoz. Meteorol.*, 1928, no. 20, pp. 165–177. (In Russ.).
- Starr M.R., Lindroos A-J., Nieminen T.M. Variation in the quality of tension lysimeter soil water samples from a finnish forest soil. *Soil Sci.*, 1985, vol. 140, no. 6, pp. 453–461.
- Tripolskaja L., Kazlauskaite-Jadzevi A. Trend analyses of percolation of atmospheric precipitation due to climate change: case study in Lithuania. *Agron. J.*, 2022, vol. 12, no. 8, pp. 1–15. <https://doi.org/10.3390/agronomy12081784>
- Turner D.P., van Broekhuizen H.J. Nutrient leaching from conifer needles in relation to foliar apoplast cation exchange capacity. *Environ. Pollut.*, 1992, vol. 75, no. 3, pp. 259–63. [https://doi.org/10.1016/0269-7491\(92\)90124-s](https://doi.org/10.1016/0269-7491(92)90124-s)
- Vadassery J., Reichelt M., Hause B., Gershenzon J., Bolland W., Mithufe A. CML42-mediated calcium signaling coordinates responses to Spodoptera herbivory and abiotic stresses in Arabidopsis. *Plant. Physiol.*, 2012, vol. 159, no. 3, pp. 1159–1175. <http://dx.doi.org/10.1104/pp.112.198150>
- Várallyay G. The impact of climate change on soils and on their water management. *Agron. Res.*, 2010, vol. 8, no. 7, pp. 385–396.
- Vanguelova E.I., Benham S., Pitman R., Moffat A.J., Broadmeadow M., et al. Chemical fluxes in time through forest ecosystems in the UK — soil response to pollution recovery. *Environ. Pollut.*, 2009, vol. 158, no. 5, pp. 1857–1869. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2009.10.044>
- Uchvatov V.P. Features of soil and groundwater of the Priokskaya zandra-alluvial plain. *Pochvoved.*, 1985, no. 6, pp. 55–65. (In Russ.).
- Uchvatov V.P. Landscape-ecological-geochemical indicators of natural background processes. *Melior. Rekulтив. Ekol.*, 2009, no. 2, pp. 5–15. (In Russ.).