

DOI: 10.31509/2658-607x-202474-158
УДК 574.4

СОСТАВ АТМОСФЕРНЫХ ВЫПАДЕНИЙ И ПОЧВЕННЫХ ВОД В СМЕШАННОМ ЛЕСУ ПРИОКСКО- ТЕРРАСНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ЗАПОВЕДНИКА

© 2024 А. К. Ходжаева^{1*}, Д. В. Сапронов¹, В. О. Лопес де Гереню¹, Н. Б. Зинякова¹,
Д. А. Хорошаев¹, И. Н. Курганова¹, В. А. Аблеева²

¹Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН – обособлен-
ное подразделение ФГБУН «Федеральный исследовательский центр «Пушкинский научный
центр биологических исследований РАН»
Россия, 142290, Пушкино, Московская обл., ул. Институтская, 2

²Федеральное государственное бюджетное учреждение «Приокско-Террасный государ-
ственный природный биосферный заповедник им. М. А. Заблоцкого»
Россия, 142200, Московская область, городской округ Серпухов, местечко Данки

*E-mail: kodzhaeva@pbcras.ru

Поступила в редакцию 14.10.2024 г.

После рецензирования: 16.11.2024

Принята к печати: 18.12.2024

В работе представлены результаты анализа состава атмосферных выпадений и почвенных вод за весенне-летний период 2024 г. на площадках смешанного леса Приокско-Террасного государственного заповедника (ПТГЗ). Обнаружено значительное варьирование анализируемых показателей атмосферных выпадений и почвенных вод. Вынос растворенного органического углерода с почвенными водами, за весенне-летний период, преобладал над поступлением с атмосферными выпадениями. Вынос углерода из верхнего 10-ти сантиметрового почвенного слоя за весенне-летний период на площадке лесного участка составил 0.3% от его запасов, на площадке открытого (лугового) участка потери углерода с почвенными водами достигли 0.6%. Вынос углерода из верхнего 20-ти сантиметрового почвенного слоя за весенне-летний период составил 0.1 и 0.2% от запасов углерода в этом слое на площадках лесного и открытого участков, соответственно. Полученные результаты подчеркивают важность мониторинга атмосферных осадков и почвенных вод для оценки углеродного баланса в лесных экосистемах.

Ключевые слова: смешанный лес, дерново-подбур, *Entic Umbric Podzol (Arenic)*, атмосферные выпадения, почвенные воды, растворенный органический углерод, растворенный общий азот

Растворенное органическое вещество (РОВ) в почвах играет важную роль в биогеохимических циклах углерода, азота, фосфора и других элементов (Kalbitz et al., 2000; Arisci et al., 2012). Основными источниками РОВ в лесных почвах являются свежий опад, подстилка, почвенное органическое вещество, корневые выделения, атмосферные и прошедшие сквозь кроны выпадения (Kalbitz et al., 2000; Volan et al., 2011; Schulze et al., 2011). Оценка поступления органического вещества в почву и его внутривертикальной миграции с почвенными водами является важной задачей для понимания взаимосвязей и уточнения оценок баланса углерода в наземных экосистемах (Gielen et al., 2011). Несмотря на интенсивные исследования, проводимые в этом направлении в последние десятилетия в контексте изменения природной среды и климата (Kaiser et al., 1996; Kalbitz et al., 2000; Camino-Serrano et al., 2016; Султанбаева и др., 2015; Лукина и др., 2018; Кузнецова и др., 2018; Казакова и др., 2018; Ершов и др., 2019 и др.), для территории Российской Федерации остается необходимость изучения динамики РОВ в почвах различных природных зон и типах землепользования. Роль лесных экосистем в регули-

ровании цикла углерода сложно переоценить (Замолотчиков и др., 2018; Казакова и др., 2018), поэтому количественная оценка поступления и передвижения РОВ в лесных почвах представляет несомненный интерес. В настоящей работе анализируются первые результаты исследований состава атмосферных выпадений и почвенных вод на площадках смешанного леса Приокско-Террасного государственного природного биосферного заповедника им. М. А. Заблоцкого (ПТГЗ). Цель – оценить поступление углерода и азота с атмосферными выпадениями и их миграцию с почвенными водами на лесной и открытой (луговой) площадках ПТГЗ.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Характеристика климата, растительности и почв. Осенью 2023 г. на лесном и открытом (луговом) участках на территории ПТГЗ (рис. 1) были организованы площадки наблюдений размером 50 м × 50 м и 15 м × 30 м, соответственно, где установили 16 осадкосборников и 44 гравитационных лизиметра на глубинах 10 см и 20 см. На лесной площадке установлено 12 осадкосборников и 30 гравитационных лизиметров. На открытой площадке установлено 4 осадкосборника и 14 гравитационных лизиметров.

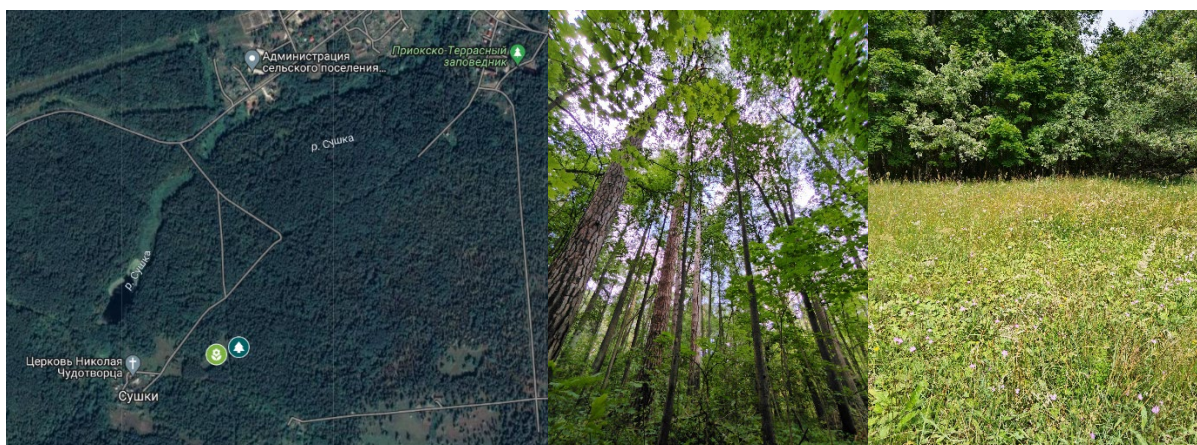


Рисунок 1. Расположение площадок лесного и открытого участков на территории ПТГЗ

Лесной участок представляет собой перестойный смешанный хвойно-мелколиственный лес (сосна, осина) с участием широколиственных пород в стадии перехода в смешанный хвойно-широколиственный лес (2, 3 ярус и подрост: липа и клен) смешанного породного состава (7С20с1Л + Е, Д, Б) с возрастом деревьев

150 лет и средней сомкнутостью полога (60–70%). Открытый участок приурочен к опушечной части лесного биогеоценоза (БГЦ) и представляет ежегодно косимый манжетково-разнотравный луг, в пределах которого также расположена Станция фонового мониторинга Росгидромета (табл. 1).

Таблица 1. Описание площадок лесного и открытого участков ПТГЗ

Характеристики	Лесная площадка	Открытая площадка
Координаты	54.9167/37.5667	54.902/37.555
Высота над уровнем моря (м)	165	161
Растительность	Смешанный хвойно-мелколиственный лес (7С20с1Л + Е, Д, Б)	Косимый манжетково-разнотравный луг
Название почвы	Дерново-подбур иллювиально-железистый	Дерново-подбур глееватый
Гранулометрический состав (слой 0–10 см)	Песчаный	Супесчаный

За период 1991–2020 гг. среднегодовая температура воздуха составляла 5.7°C со среднемноголетними температурами в июле и январе $+18.8^{\circ}\text{C}$ и -7.2°C , соответственно (Kurganova et. al., 2023). Среднегодовая сумма осадков за тот же период на исследуемой территории составляла 640 мм. Постоянный снежный покров в разные годы образуется в регионе, начиная с ноября до середины января, и держится, как правило, до середины апреля. Более половины осадков (67% от годовой суммы) выпадает в теплый период года. Для региона характерно превышение осадков над испарением, что создает условия для промывного водного режима.

Почвенный покров исследуемых участков представлен дерново-подбуром (*Entic Umbric Podzol (Arenic)*) принадлежащим к стволу постлитогенных почв и отделу альфегумусовых почв. Диагностируется по наличию аккумулятивного серогумусового (дернового) АУ и альфегумусового ВF горизонтов. Реакция почв слабокислая, емкость поглощения 10-15 мг-экв/100 г почвы (Классификация почв, 2004). Почвенный покров исследуемых участков сформирован на флювиогляциальных отложениях. В 2023 г. на площадках лесного и открытого участков ПТГЗ были заложены почвенные разрезы

(Приложение). Проведенный морфологический анализ показал, что почвенный покров лесного участка представлен дерново-подбуром иллювиально-железистым, диагностируемым по наличию железисто-иллювиального горизонта ВF мощностью 28(33) см, темно желто-бурого цвета, залегающего непосредственно под аккумулятивным серогумусовым (дерновым) горизонтом АУ мощностью 5(10) см. Почвенный покров открытого участка представлен дерново-подбуром глееватым, диагностируемым по наличию оглеения в виде светло-серосизых пятен в нижней части профиля из-за застаивания воды над водоупором. Отбор почвенных образцов проводили из трех стенок разрезов по фиксированным слоям (0–5, 5–10, 10–20, 20–30, 30–40, 40–60, 60–80 и 80–100 см) для определения содержания и запасов органического углерода ($C_{\text{орг}}$, кг/м²), общего азота ($N_{\text{общ}}$, кг/м²) и плотности сложения. Анализ почвенных образцов выполняли по общепринятым для почвенных исследований методикам (Теория и практика ..., 2006; Теории и методы ..., 2007). Используя результаты определения плотности сложения, содержания $C_{\text{орг}}$ и $N_{\text{общ}}$, рассчитывали запасы $C_{\text{орг}}$ и $N_{\text{общ}}$ в 0–10 и 0–20 см почвенных слоях.

Отбор и анализ атмосферных выпадений и почвенных вод. Водные пробы начали отбирать в апреле 2024 г. и далее их отбор проводили в первую неделю каждого месяца. Отбор водных проб проводили согласно требованиям методических рекомендаций, разработанных коллективом специалистов консорциума РИТМ углерода (Методические..., 2024а,б). При отборе измеряли объем каждой получаемой пробы градуированным цилиндром (V, мл). Отобранные водные пробы транспортировали в лабораторию, где разделяли на две части. В первой порции воды, без дополнительной пробоподготовки, измеряли электропроводность (ЕС, мкСм/см) кондуктометрически и рН потенциометрически. Вторую часть водных проб фильтровали через мембранный фильтр с диаметром отверстий 0.45 мкм и до начала анализов хранили при температуре 4°C, согласно требованиям ГОСТ 31958-2012. Определение содержания общего углерода (ТС, мг/л), неорганического углерода (ТИС, мг/л) и растворенного связанного азота (DN, мг/л) проводили на анализаторе элементного состава ТОПАЗ NC (Россия). По разнице между ТС и ТИС находили содержание растворенного органического углерода (DOC, мг/л) (ГОСТ 31958-2012).

Результаты измерений выражали как среднее \pm доверительный интервал. Математическую обработку данных проводили с помощью Microsoft Excel.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Характеристика почв исследуемых участков. Запасы органического углерода и общего азота в слоях 0–10 и 0–20 см различались между собой на площадках лесного и открытого участков ПТГЗ (табл. 2). Так, в верхних органоминеральных слоях дерново-подбура на площадке лесного участка запасы $S_{орг}$ в 1.5 раза превышали таковые на открытом участке. Запасы $N_{общ}$ на площадках лесного и открытого участков были примерно равны. Основными факторами, влияющими на накопление органического углерода в органогенных и минеральных слоях лесных почв выступают климат, рельеф, почвообразующие породы, биота, история землепользования (Щепащенко и др., 2013; Телеснина и др., 2017; Рыжова и др., 2020; Чернова и др., 2021 и др.). Оценка влияния растительности на запасы углерода в почве, наряду с другими факторами, при исследовании доминирующих типов хвойно-широколиственных лесов Европейской части России, показала, что наиболее ярко это

влияние проявлялось в верхней 0-30 см почвенной толще, а максимальные запасы углерода в минеральных слоях отме-

чались в лесах с наиболее высоким функциональным разнообразием растений (Kuznetsova et. al., 2021).

Таблица 2. Запасы $C_{орг}$ и $N_{общ}$ в 0–10 и 0–20 см слоях дерново-подбуря на площадках лесного (I) и открытого (II) участков ПТГЗ

Площадка / слой	I / 0-10 см	I / 0-20 см	II / 0-10 см	II / 0-20 см
$C_{орг}$ (кг С/м ²)	2.98	4.02	1.86	3.07
$N_{общ}$ (кг N/м ²)	0.19	0.30	0.16	0.29

Помимо перечисленных выше факторов, оказывающих влияние на запасы органического углерода в лесных почвах, важное значение имеет складывающийся водный режим (составляющая климатического фактора), который может способствовать увеличению депонирования углерода (Kalbitz, Kaiser, 2008) или вымыванию его соединений за пределы лесной экосистемы (Гашкина и др., 2020; Nakhavali et al., 2021).

Объемы атмосферных и почвенных вод. Атмосферные выпадения и почвенные воды отбирали в мае, июне, июле и августе, что соответствовало накоплению вод за предыдущий месяц. Таким образом, представляемые в работе характеристики атмосферных выпадений и почвенных вод соответствуют апрелю, маю, июню и июлю (рис. 2 и 3). Из-за отсутствия осадков в августе отобрать воды в

начале сентября не удалось. Объемы атмосферных выпадений на открытой (BD) и лесной (TF) площадках отличались значительной изменчивостью.

Значения коэффициентов вариации (CV) для объемов атмосферных выпадений открытого участка составляли от 3 до 16%, для лесного – от 8 до 40%. Объемы атмосферных вод варьировали от 835 до 1682 мл под лесом и от 903 до 1683 мл на открытом участке, с максимумами в июне и июле (рис. 2). В большинстве случаев объемы атмосферных выпадений под лесом были значительно меньше отобранных на открытой площадке, и это особенно проявляется в летний период на пике развития ассимиляционного аппарата у древесных растений, когда сомкнутость лесного полога максимальна, что снижает объемы проникающих под полог осадков (Лукина и др., 2018). Однако,

при наличии в лесном древостое просветов (окон) объемы атмосферных подкоро-

новых выпадений и на открытом участке могут быть вполне сопоставимы.

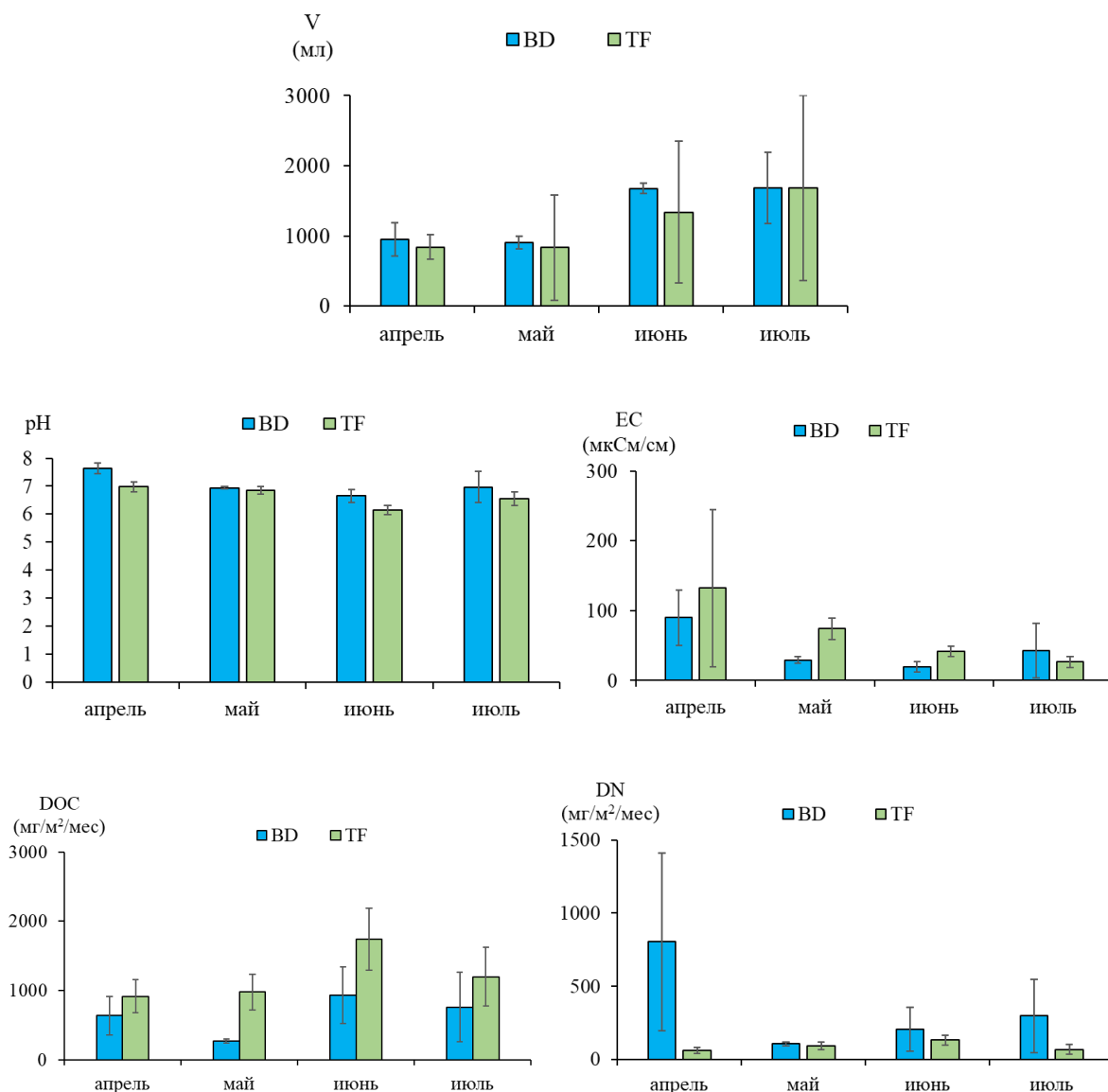


Рисунок 2. Характеристики атмосферных выпадений отобранных на открытой (BD) и лесной (TF) площадках ПТГЗ за весенне-летний период 2024 г.

Условные обозначения: V – объем; pH – кислотность; EC – электропроводность; DOC – содержание растворенного органического углерода; DN – содержание растворенного связанного азота.

Объемы вод, прошедших сквозь верхние органоминеральные слои дерново-подбур, также отличались значительной изменчивостью. Для почвенных вод, отобранных как на лесном, так и открытом участках,

полученные значения коэффициентов вариации (CV) были высокими (> 33%). Причем, наибольший разброс получен для вод, прошедших сквозь 20-ти сантиметровой почвенный слой на открытом участке.

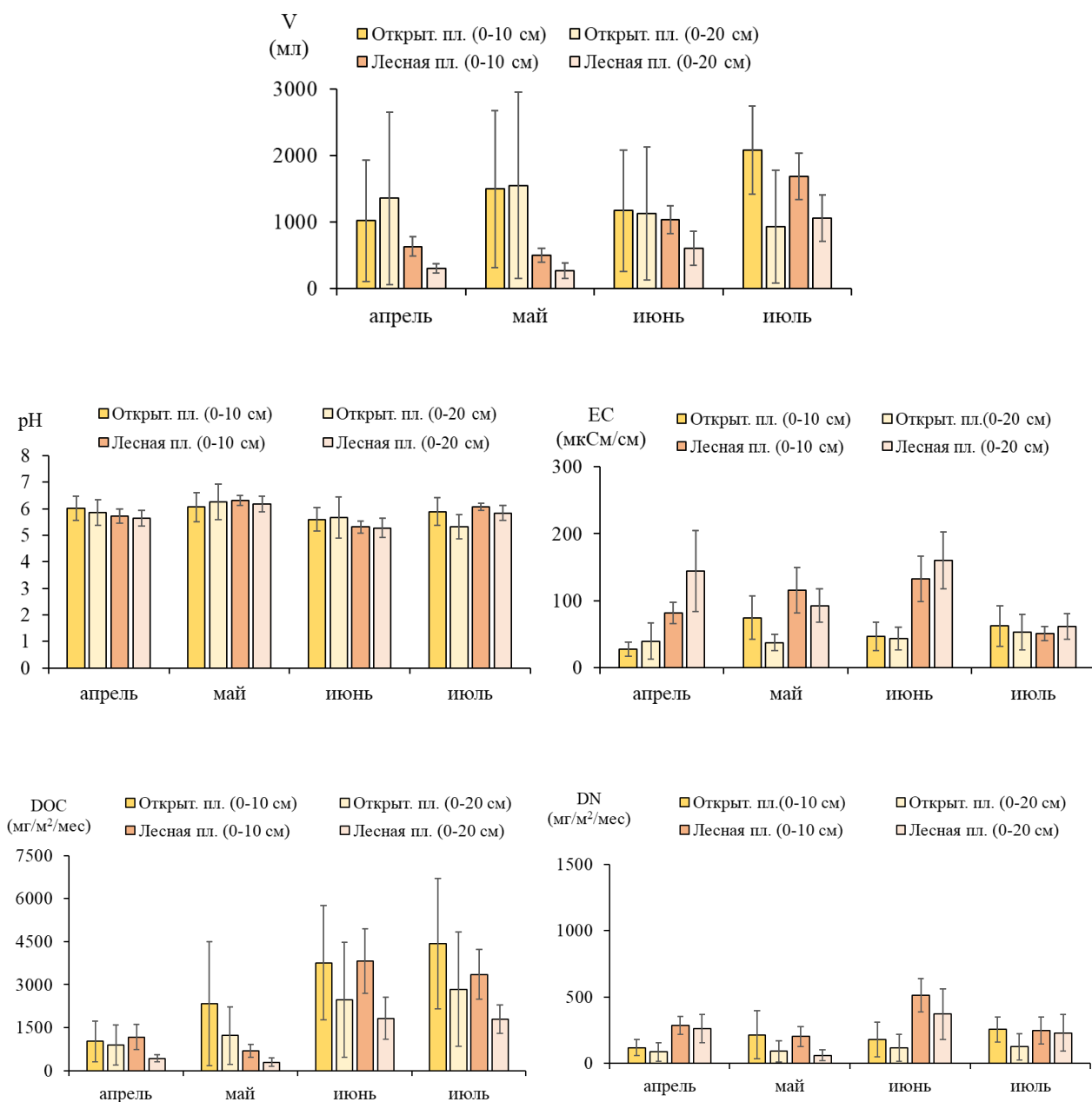


Рисунок 3. Характеристики почвенных вод отобранных на лесной и открытой площадках ПТГЗ за весенне-летний период 2024 г.

Условные обозначения: V – объем; pH – кислотность; EC – электропроводность; DOC – содержание растворенного органического углерода; DN – содержание растворенного связанного азота.

В среднем за исследуемые периоды объемы вод прошедших сквозь 10 и 20-ти сантиметровые почвенные слои под лесом составляли 503–1688 и 271–1060 мл,

соответственно, на открытом участке были существенно выше: 1018–2078 и 932–1553 мл, соответственно. Максимальные объемы почвенных вод на

площадках обоих участков фиксировались в июле. Оценка внутриводного изменения объемов почвенных вод показала, что с увеличением мощности почвенного слоя уменьшался объем получаемой водной пробы (рис. 3).

Свойства атмосферных и почвенных вод. Реакция среды атмосферных основных выпадений была нейтральной. Прохождение осадков сквозь кроны деревьев и смыв с них частиц пыли, органических и минеральных веществ способствовали их подкислению (рис. 2). После прохождения атмосферных выпадений сквозь почвенные слои реакция среды была слабокислой или кислой (рис. 3). Для величин рН получена высокая воспроизводимость результатов, значения CV не превышали 10%. Показатели ЕС атмосферных основных, сквозных выпадений и почвенных вод варьировали в значительной степени ($CV > 33\%$). Средние показатели ЕС не превышали 200 мкСм/см.

Полученные за весенне-летний период результаты по количествам поступающих с атмосферными выпадениями и вымываемых с почвенными водами DOC и DN также демонстрируют значительное варьирование (рис. 2 и 3), что согласуется с результатами других исследований (Султанбаева и др., 2015; Кузнецова,

2022 и др.). В апреле количество DOC, поступающее с атмосферными выпадениями на открытом участке, в среднем составляло 636 мг/м²/мес., в мае снизилось до 272 мг/м²/мес., в июне и июле вновь возросло до 759–928 мг/м²/мес. По сравнению с атмосферными выпадениями на открытом участке, количество DOC в водах, прошедших сквозь кроны деревьев, в среднем было в 1.5–3 раза выше, достигая 917, 977, 1740 и 1199 мг/м²/мес. в апреле, мае, июне и июле, соответственно. Количество DN, поступившее с осадками на открытом участке, в апреле в среднем составило 805 мг/м²/мес., по сравнению с 62 мг/м²/мес. в лесу. В мае и июне различия в количествах DN поступающее с осадками на открытой и лесной площадках были менее значительны (108 и 95, 205 и 133 мг/м²/мес., соответственно), в июле они вновь возросли (299 и 63 мг/м²/мес., соответственно). Изменение химического состава вод атмосферных осадков после прохождения сквозь кроны деревьев, главным образом, связывают с перемещением частиц и аэрозолей с поверхности деревьев, а также вымыванием, выделением и поглощением ионов растительными тканями (Шильцова, Ласточкина, 2006; Arisci et al., 2012).

Состав лизиметрических вод отра-

жает взаимодействия атмосферных осадков с почвенной толщей. Выщелачивание растворенных органических соединений из лесной подстилки – один из основных путей миграции углерода в более глубокие почвенные слои (Fröberg et al., 2011). Вынос DOC с почвенными водами на площадке открытого участка в среднем составлял 1021–4437 и 885–2836 мг/м²/мес., для 0–10 и 0–20 см слоев, соответственно, значительно варьируя в зависимости от периода отбора (рис. 3). Под пологом леса количество DOC, выносимое с почвенными водами, составляло в среднем 688–3820 и 289–1825 мг/м²/мес. для слоев 0–10 и 0–20 см, соответственно, также значительно варьируя в зависимости от периода отбора. Количество DOC, выносимое с водами, прошедшими сквозь 0–10 см органоминеральный слой дерново-подбуря было в 1.5–2 раза выше, чем прошедших сквозь слой 20 см. Снижение концентрации DOC в водах, прошедших сквозь более мощные почвенные слои, вызванное его фиксацией, может таким образом способствовать увеличению депонирования углерода (Kalbitz, Kaiser, 2008). Оценка внутрипрофильного изменения содержания DN показала, что в водах, прошедших

сквозь 0–10 см почвенный слой, этот показатель на площадках обоих исследуемых участков был в среднем в 1.8 раз выше, чем в водах прошедших сквозь слой 0–20 см. Самое высокое содержание DOC и DN отмечено в почвенных водах в июне. Определение степени расхождения результатов по количеству DOC и TN в водах, прошедших сквозь 0–10 и 0–20 см почвенные слои, показало, что значения CV в большинстве случаев, были очень высокими (> 33%). Причем, наибольшие разбросы получены для 0–20 см слоя почв открытого участка для DOC и 0–20 см слоя почв лесного участка для TN.

Вынос углерода из верхней 10 см почвенной толщи за весенне-летний период 2024 года на площадке лесного участка в среднем составил 0.3% от его запасов, на площадке открытого участка увеличился до 0.6%. Вынос углерода из 20 см почвенной толщи за этот период на площадке лесного участка составил 0.1% от запасов, на площадке открытого участка – 0.2%.

Вынос азота из 10 см почвенного слоя за исследуемый период на площадке под лесом в среднем составил 0.7% от его запасов, на площадке открытого участка 0.5%. Из 20 см почвенной толщи вынос

азота за исследуемый период на площадке лесного участка составил 0.3% от запасов, на площадке открытого участка – 0.1%.

ВЫВОДЫ

В ходе весенне-летнего периода наблюдений 2024 г. на площадках лесного и открытого участков Приокско-Террасного государственного заповедника объемы и состав атмосферных выпадений и почвенных вод значительно варьировали. Объемы атмосферных выпадений на лесной и открытой площадках были максимальны в июне и июле, в то время как максимальные объемы почвенных вод на площадках обоих участков зафиксированы в июле. С увеличением мощности почвенного слоя наблюдалось снижение объема получаемой водной пробы.

Реакция среды атмосферных выпадений открытой площадки была нейтральной и слабо зависела от срока отбора, а прохождение сквозь кроны деревьев и почвенную толщу, способствовало подкислению вод. Средние показатели электропроводности (ЕС) не превышали 200 мкСм/см.

Поступление растворенного органического углерода (DOC) и растворен-

ного связанного азота (DN) с атмосферными осадками значительно варьировало в зависимости от периода отбора. Прохождение осадков сквозь кроны деревьев увеличило количество DOC, поступающее на поверхность, в 1.5–3 раза. Воды, прошедшие сквозь кроны деревьев, характеризовались значительно меньшим количеством DN, поступившим на поверхность. Что может быть связано как с поглощением соединений азота древесными растениями, так и с большей испаряемостью на открытом участке, что, в свою очередь, может приводить к увеличению концентрации азота в отбираемых водных пробах.

Вынос DOC с почвенными водами на площадке лесного участка был в 1.5 раза ниже, чем на открытом. Количество DN, выносимое с почвенными водами из слоев 0–10 и 0–20 см на площадке лесного участка, было в 2 раза выше, чем на открытом, причина этого скорее всего связана с повышенным содержанием азота в лесной подстилке за счет вклада листовых деревьев и его вымыванием в нижележащие горизонты. Почвенные воды, прошедшие сквозь 0–10 см слой, характеризовались более высоким содержанием DOC и DN, по сравнению с 0–20 см

слоем, что связано с их закреплением в органоминеральной толще дерново-подбура. Самое высокое содержание DOC и DN в почвенных водах отмечено в июне.

На площадках лесного и открытого участков ПТГЗ вынос DOC с водами, прошедшими сквозь органоминеральные слои дерново-подбура песчаного и супесчаного за весенне-летний (с апреля по июль) период, превышал поступление с атмосферными осадками. Вынос углерода из верхнего 10-см слоя за весенне-летний период на площадке лесного участка в среднем составлял 0.3% от запасов, на открытом (луговом) – 0.6%. Вынос углерода из 20-сантиметрового слоя за исследуемый период на площадке лесного участка в среднем составлял 0.1%, на открытом участке – 0.2%.

Полученные результаты подчеркивают важность мониторинга атмосферных выпадений и почвенных вод для изучения миграции углерода и азота в лесных экосистемах.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках ВИП ГЗ «Разработка системы наземного и дистанционного мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов на территории Российской Федерации...» (рег. № 123030300031-6)».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Гашкина Н. А., Моисеенко Т. И., Дину М. И., Тацый Ю. Г., Баранов Д. Ю.* Биогеохимическая миграция элементов в системе «атмосферные осадки–короновые воды–почвенные воды–озеро» в фоновом регионе (Валдайский национальный парк) // *Геохимия*. 2020. Т. 65. № 7. С. 693–710. DOI: 10.31857/S0016752520050027
- ГОСТ 31958-2012. Межгосударственный стандарт. Вода. Методы определения содержания общего и растворенного органического углерода. Water. Methods for determination of total and dissolved organic carbon. М., 2012. 15 с.
- Ершов В. В., Лукина Н. В., Орлова М. А., Исаева Л. Г., Смирнов В. Э., Горбачева Т. Т.* Оценка динамики состава почвенных вод северотаежных лесов при снижении аэротехногенного загрязнения выбросами медно-никелевого комбината // *Сибирский экологический журнал*. 2019. № 1. С. 119–132. DOI: 10.15372/SEJ20190110
- Замолодчиков Д. Г., Грабовский В. И., Честных О. В.* Динамика баланса углерода в лесах федеральных округов // *Вопросы лесной науки*. 2018. Т. 1 (1). С. 1–24. DOI: 10.31509/2658-607x-2018-1-1-1-24

- Казакова А. И., Семиколенных А. А., Горнов А. В., Горнова М. В., Лукина Н. В.* Влияние растительности на лабильные характеристики лесных почв зандровых местностей заповедника «Брянский лес» // Вестник Московского университета. Серия 17. Почвоведение. 2018. № 3. С. 9–15.
- Классификация и диагностика почв России / Авторы и составители: Л. Л. Шишов, В. Д. Тонконогов, И. И. Лебедева, М. И. Герасимова. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
- Кузнецова А. И., Лукина Н. В., Орлова М. А., Тебенькова Д. Н.* Сравнительная оценка размеров выноса углерода с почвенными водами в таежных и хвойно-широколиственных лесах // Аккумуляция углерода в лесных почвах и сукцессионный статус лесов. Под ред. Н. В. Лукиной. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2018. С. 140–146.
- Лукина Н. В., Ершов В. В., Горбачева Т. Т., Орлова М. А., Исаева Л. Г., Тебенькова Д. Н.* Оценка состава почвенных вод северо-таежных хвойных лесов фоновых территорий индустриально развитого региона // Почвоведение. 2018. № 3. С. 284–296.
- Методические рекомендации по оценке поступления растворенного органического углерода с атмосферными выпадениями (электронный ресурс). РИТМ углерода. 2024а. URL: <https://clck.ru/3G8YVm> (дата обращения 06.10.2024).
- Методические рекомендации по оценке выноса органического углерода с почвенными водами (электронный ресурс). РИТМ углерода. 2024б. URL: <https://clck.ru/3G8YbB> (дата обращения 06.10.2024).
- Рыжова И. М., Телеснина В. М., Ситникова А. А.* Динамика свойств почв и структуры запасов углерода в постагрогенных экосистемах в процессе естественного лесовосстановления // Почвоведение. 2020. № 2. С. 230–243. DOI: 10.31857/S0032180X20020100
- Султанбаева Р. Р., Коццик Г. Н., Смирнова И. Е., Коццик С. В.* Поступление и миграция растворимого органического углерода в почвах лесных экосистем подзоны широколиственно-хвойных лесов // Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение. 2015. № 4. С. 3–42.
- Телеснина В. М., Курганова И. Н., В. О. Лопес де Греню, Овсепян Л. А., Личко В. И.,*

- Ермолаев А. М., Мирин Д. М.* Динамика свойств почв и состава растительности в ходе постагрогенного развития в разных биоклиматических зонах // Почвоведение. 2017. Т. 50. № 12. С. 1514–1534. DOI: 10.7868/S0032180X17120115
- Теории и методы физики почв / Под ред. Е. В. Шеина, Л. О. Карпачевского. Москва: «Гриф и К», 2007. 616 с.
- Теория и практика химического анализа почв / Под ред. Л. А. Воробьевой. Москва: ГЕОС, 2006. 400 с.
- Чернова О. В., Голозубов О. М., Алябина И. О., Щепашенко Д. Г.* Комплексный подход к картографической оценке запасов органического углерода в почвах России // Почвоведение. 2021. № 3. С. 273–286, DOI: 10.31857/S0032180X21030047
- Шильцова Г. В., Ласточкина В. Г.* Влияние полога соснового и березового леса на химический состав осадков в заповеднике «Кивач» // Труды научного Карельского центра РАН. Петрозаводск. 2006. С. 180–184.
- Щепашенко Д. Г., Мухортова Л. В., Швиденко А. З., Ведрова Э. Ф.* Запасы органического углерода в почвах России // Почвоведение. 2013. № 2. С. 123–123.
- Arisci S., Rogora M., Marchetto A., Dichiaro F.* The role of forest type in the variability of DOC in atmospheric deposition at forest plots in Italy // Environmental Monitoring and Assessment. 2012. Vol. 184. P. 3415–3425.
- Bolan N. S., Adriano D. C., Kunhikrishnan A., James T., McDowell R., Senesi N.* Dissolved organic matter: Biogeochemistry, dynamics, and environmental significance in soils // Advances in Agronomy. 2011. Vol. 110. P. 1–75.
- Camino-Serrano M., Graf Pannatier E. G., Vicca S.* Trends in soil solution dissolved organic carbon (DOC) concentrations across European forests // Biogeosciences. 2016. Vol. 13. P. 5567–5585.
- Fröberg M., Hansson K., Kleja D. B., Alavi Gh.* Dissolved organic carbon and nitrogen leaching from Scots pine, Norway spruce and silver birch stands in southern Sweden // Forest ecology and management. 2011. Vol. 262. No. 9. P. 1742–1747.
- Gielen B., Neiryneck J., Luyssaert S., Janssens I. A.* The importance of dissolved organic carbon fluxes for the carbon balance of a temperate Scots pine forest // Agricultural and Forest Meteorology. 2011. Vol. 151. No. 3. P. 270–278.

- Kaiser K., Guggenberger G., Zech W.* Sorption of DOM and DOM fractions to forest soils // *Geoderma*, 1996. Vol. 74 (3–4). P. 281–303.
- Kalbitz K., Kaiser K. Contribution of dissolved organic matter to carbon storage in forest mineral soils // *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. 2008. Vol. 171. P. 52–60.
- Kalbitz K., Solinger S., Park J. H., Michalzik B., Matzner E. Controls on the dynamics of dissolved organic matter in soils: A review // *Soil Science*. 2000. Vol. 165. P. 277–304.
- Kurganova I. N., Lopes de Gerenyu V. O., Myakshina T. N.* Temperature Sensitivity of Soil Respiration in Grasslands in Temperate Continental Climate Zone: Analysis of 25-Year-Long Monitoring Data // *Eurasian Soil Science*. 2023. Vol. 56. P. 1232–1246. DOI: 10.1134/S1064229323601130
- Kuznetsova A. I., Geraskina A. P., Lukina N. V., Smirnov V. E., Tikhonova E. V., Shevchenko N. E., Gornov A. V., Ruchinskaya E. V., Tebenkova D. N.* Linking Vegetation, Soil Carbon Stocks, and Earthworms in Upland Coniferous–Broadleaf Forests // *Forests*. 2021. Vol. 12. Article 1179. DOI: 10.3390/f12091179
- Nakhavali M., Lauerwald R., Regnier P., Guenet B., Chadburn S., Friedlingstein P.* Leaching of dissolved organic carbon from mineral soils plays a significant role in the terrestrial carbon balance // *Global change biology*. 2021. Vol. 27. No. 5. P. 1083–1096. DOI: 10.1111/gcb.15460
- Schulze K., Borken W., Matzner E.* Dynamics of dissolved organic C-14 in throughfall and soil solution of a Norway spruce forest // *Biogeochemistry*. 2011. Vol. 106 (3). P. 461–473. DOI: 10.1007/s10533-010-9526-2

REFERENCES

- Arisci S., Rogora M., Marchetto A., Dichiaro F., The role of forest type in the variability of DOC in atmospheric deposition at forest plots in Italy, *Environmental Monitoring and Assessment*, 2012, Vol. 184, pp. 3415–3425.
- Bolan N. S., Adriano D. C., Kunhikrishnan A., James T., McDowell R., Senesi N., Dissolved organic matter: Biogeochemistry, dynamics, and environmental significance in soils, *Advances in Agronomy*, 2011, Vol. 110, pp. 1–75.
- Camino-Serrano M., Graf Pannatier E. G., Vicca S., Trends in soil solution dis-

- solved organic carbon (DOC) concentrations across European forests, *Biogeochemistry*, 2016, Vol. 13, pp. 5567–5585.
- Chernova O. V., Golozubov O. M., Aljabina I. O., Shhepashhenko D. G., Integrated approach to spatial assessment of soil organic carbon in the Russian Federation, *Eurasian Soil Science*, 2021, Vol. 54, No 3, pp. 273–286, 10.31857/S0032180X21030047
- Ershov V. V., Lukina N. V., Orlova M. A., Isaeva L. G., Smirnov V. Je., Gorbacheva T. T., Ocenka dinamiki sostava pochvennyh vod severotaezhnyh lesov pri snizhenii aerotehnogenogo zagrjaznenija vybrosami medno-nikelevogo kombinata (Assessment of soil water composition dynamics in northern taiga forests with the reduction of aerotechnogenic pollution from emissions of a copper-nickel plant), *Sibirskij ekologicheskij zhurnal*, 2019, No 1, pp. 119–132, DOI: 10.15372/SEJ20190110
- Fröberg M., Hansson K., Kleja D. B., Alavi Gh., Dissolved organic carbon and nitrogen leaching from Scots pine, Norway spruce and silver birch stands in southern Sweden, *Forest ecology and management*, 2011, Vol. 262, No 9, pp. 1742–1747.
- Gashkina N. A., Moiseenko T. I., Dinu M. I., Tacij Ju. G., Baranov D. Ju., Biogeochemical migration of elements in the system «atmospheric precipitation–crown waters–soil waters–lake» in the background region (Valdai National Park), *Geochemistry International*, 2020, Vol. 58, No 7, pp. 835–849, DOI: 10.31857/S0016752520050027
- Gielen B., Neiryneck J., Luysaert S., Janssens I. A., The importance of dissolved organic carbon fluxes for the carbon balance of a temperate Scots pine forest, *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, Vol. 151, No 3, pp. 270–278.
- GOST 31958-2012, Mezhgosudarstvennyj standart. Voda. Metody opredelenija sodержaniya obshhego i rastvoren-nogo organicheskogo ugleroda (Water. Methods for determination of total and dissolved organic carbon), Moscow, 2012. 15 p.
- Kaiser K., Guggenberger G., Zech W., Sorption of DOM and DOM fractions to forest soils, *Geoderma*, 1996, Vol. 74 (3–4), pp. 281–303.
- Kalbitz K., Kaiser K., Contribution of dissolved organic matter to carbon storage in forest mineral soils, *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2008, Vol. 171, pp. 52–60.

- Kalbitz K., Solinger S., Park J. H., Michalzik B., Matzner E., Controls on the dynamics of dissolved organic matter in soils: A review, *Soil Science*, 2000, Vol. 165, pp. 277–304.
- Kazakova A. I., Semikolennyh A. A., Gornov A. V., Gornova M. V., Lukina N. V. Vlijanie rastitel'nosti na labil'nye harakteristiki lesnyh pochv zandrovyh mestnostej zapovednika «Brjanskij les» (Influence of vegetation on labile characteristics of forest soils in the sandy areas of the Bryansk Forest Reserve), *Vestnik Moskovskogo universiteta, Soil Science*, Ser. 17, 2018, No 3, pp. 9–15.
- Klassifikacija i diagnostika pochv Rossii (Classification and Diagnosis of Soils in Russia), Avtory i sostaviteli: L. L. Shishov, V. D. Tonkonogov, I. I. Lebedeva, M. I. Gerasimova. Smolensk: Ojkumena, 2004. 342 p.
- Kurganova I. N., Lopes de Gerenyu V. O., Myakshina T. N., Temperature Sensitivity of Soil Respiration in Grasslands in Temperate Continental Climate Zone: Analysis of 25-Year-Long Monitoring Data. *Eurasian Soil Science*, 2023, Vol. 56, pp. 1232–1246, DOI: 10.1134/S1064229323601130
- Kuznecova A. I., Lukina N. V., Orlova M. A., Teben'kova D. N., Sravnitel'naja ocenka razmerov vynosa ugleroda s pochvennymi vodami v taezhnyh i hvojno-shirokolistvennyh lesah (Comparative Assessment of Carbon Export with Soil Waters in Taiga and Coniferous-Broadleaf Forests), *Akkumuljacija ugleroda v lesnyh pochvah i sukcesionnyj status lesov*. Moscow: KMK, 2018, pp. 140–146.
- Kuznetsova A. I., Geraskina A. P., Lukina N. V., Smirnov V. E., Tikhonova E. V., Shevchenko N. E., Gornov A. V., Ruchinskaya E. V., Tebenkova D. N., Linking Vegetation, Soil Carbon Stocks, and Earthworms in Upland Coniferous–Broadleaf Forests, *Forests*, 2021, Vol. 12, Article 1179, DOI: 10.3390/f12091179
- Lukina N. V., Orlova M. A., Teben'kova D. N., Ershov V. V., Gorbacheva T. T., Isaeva L. G., Assessment of Soil Water Composition in Northern Taiga Coniferous Forests of Background Areas in an Industrially Developed Region, *Eurasian Soil Science*, 2018, Vol 51, No 3. pp. 277–289.
- Metodicheskie rekomendacii po ocenke postuplenija rastvorenogo organicheskogo ugleroda s atmosferynymi vypadenijami (Methodological recommendations for assessing the input of dissolved organic carbon from atmospheric deposition), Electronic resource, RITM carbon, 2024a, URL:

- <https://clck.ru/3G8YVm> (October 06, 2024).
- Metodicheskie rekomendacii po ocenke vynosa organicheskogo ugleroda s pochvennymi vodami (Methodological Recommendations for Assessing the Export of Organic Carbon with Soil Water), Electronic resource, RITM carbon, 2024b, URL: <https://clck.ru/3G8YbB> (October 06, 2024).
- Nakhavali M., Lauerwald R., Regnier P., Guenet B., Chadburn S., Friedlingstein P., Leaching of dissolved organic carbon from mineral soils plays a significant role in the terrestrial carbon balance, *Global change biology*, 2021, Vol. 27, No 5, pp. 1083–1096, DOI: 10.1111/gcb.15460
- Ryzhova I. M., Telesnina V. M., Sitnikova A. A., Dynamics of Soil Properties and Carbon Stock Structure in Post-Agricultural Ecosystems During Natural Forest Recovery, *Eurasian Soil Science*, 2020. Vol 53, No 2. pp. 240–252, DOI: 10.31857/S0032180X20020100
- Schulze K., Borken W., Matzner E., Dynamics of dissolved organic C-14 in throughfall and soil solution of a Norway spruce forest, *Biogeochemistry*, 2011, Vol. 106 (3), pp. 461–473, DOI: 10.1007/s10533-010-9526-2
- Shhepashhenko D. G., Muhortova L. V., Shvidenko A. Z., Vedrova Je. F., Organic Carbon Stocks in the Soils of Russia, *Eurasian Soil Science*, 2013, Vol 46, No 2. pp. 107–116.
- Shil'cova G. V., Lastochkina V. G., Vlijanie pologa sosnovogo i berezovogo lesa na himicheski sostav osadkov v zapovednike «Kivach» (The Influence of Pine and Birch Forest Canopy on the Chemical Composition of Precipitation in the «Kivach» Nature Reserve), *Trudy nauchnogo Karel'skogo centra RAN, Petrozavodsk*, 2006, pp. 180–184.
- Sultanbaeva R. R., Kopitsky G. N., Smirnova I. E., Kopitsky S. V. Postuplenie i migracija rastvorimogo organicheskogo ugleroda v pochvah lesnyh jekosistem podzony shirokolistvenno-hvojnyh lesov (Input and Migration of Dissolved Organic Carbon in the Soils of Forest Ecosystems in the Broadleaf-Coniferous Forest Subzone), *Vestnik Moskovskogo universiteta, Soil Science, Ser. 17*, 2015, No 4. pp. 3–42.
- Telesnina V. M., Kurganova I. N., Lopes de Gerenyu V. O., Ovsepjan L. A., Lichko V. I., Ermolaev A. M., Mirin D. M., Dynamics of soil properties and vegetation composition during post-agricultural development in different bioclimatic

zones, *Eurasian Soil Science*, 2017, Vol 50, No 12, pp. 1515–1534, DOI: 10.7868/S0032180X17120115

Teorii i metody fiziki pochv (Theories and Methods of Soil Physics), Pod red. E. V. Sheina, L. O. Karpachevskogo, Moscow: «Grif i K», 2007, 616 p.

Teorija i praktika himicheskogo analiza pochv (Theory and Practice of Soil Chemical

Analysis), Pod red. L. A. Vorobevoj, Moscow, «GEOS», 2006, 400 p.

Zamolodchikov D. G., Grabovskij V. I., Chestnyh O. V., *Dinamika balansa ugleroda v lesah federal'nyh okrugov* (Dynamics of carbon balance in the forests of federal districts), *Voprosy lesnoj nauki*, 2018, No. 1 (1), pp. 1–24, DOI: 10.31509/2658-607x-2018-1-1-1-24

Приложение

Описание почвенных профилей на площадках лесного (I) и открытого участков (II) ПТГЗ

(I) Дерново-подбур иллювиально-железистый	(II) Дерново-подбур глееватый
	
<p>О. Подстилка (степень разложения 50%), мощность 2 см. Хвоя сосны, листья липы и клена, сосновые шишки, кусочки коры, палочки, мелкие веточки; кислица, гравилат городской, копытень европейский, майник, недотрога, звездчатка, крапива.</p>	<p>АУ. 0–5 см. Серо-гумусовый. Свежий, буровато-серый (10YR 4/2), рыхлый, видна кремнеземистая присыпка, густо пронизан корнями, пылевато-комковатая структура, супесчаный, переход четкий по наличию корней, граница ровная.</p>
<p>АУ. 0–5(10) см. Серо-гумусовый. Темно-сероватый (10YR 3/2), свежий, рыхлый, мелко-порошисто-комковатый, скелетаны (кремнеземистая присыпка), обильно пронизан корнями травянистых растений, встречаются шишки, камни окатанные и не окатанные (гравий), граница неровная, переход заметен по цвету и плотности.</p>	<p>АЕ. 5–22(24) см. Гумусово-элювиальный. Серовато-бурый (10YR 5/3) с белесоватой присыпкой (скелетаны), свежий, рыхлый, структура средне-мелкокомковатая, супесчаный, корни травянистых растений; переход ясный по цвету, граница неровная.</p>
<p>ВФ. 5(10)–38 см. Иллювиально-железистый. Темно-желто-бурый (10YR 4/4), влажный, слабо уплотнен, бесструктурный, песчаный, корни древесных растений, камни разных размеров окатанные и не окатанные (гравий, галька), часть из них покрыта бурыми пленками; граница неровная, переход постепенный по цвету.</p>	<p>ВФ. 22(24)–40(45) см. Иллювиально-железистый. Желтовато-ярко-бурый (10YR 5/6), свежий, рыхлы, структура мелкокомковато-порошистая, супесчаный; встречаются камни разных размеров окатанные и не окатанные (гравий, галька), некоторые покрыты бурыми пленками; переход ясный по цвету.</p>
<p>ВС. 38–73 см. Переходный. Желто-бурый (10YR 5/4), влажный, уплотнен, песчаный, бесструктурный, корни древесных растений, камни разных размеров окатанные и неокатанные (гравий, галька, мелкие валуны), граница не ровная, переход по цвету и плотности.</p>	<p>ВСg. 40(45)–70 см. Переходный. Красновато-бурый (7.5YR 5/4), свежий; рыхлый, в нижней части усиливается красноватый оттенок увеличивается плотность, бесструктурный, встречаются корни древесных растений диаметром 3 - 7 мм, переход в ясный по цвету и плотности.</p>
<p>С. 73–100 см и ниже. Материнская порода. Желто-красный (5YR 3/4), влажный, очень плотный, среднесуглинистый, структура глыбисто-призматическая, аккумуляция железа в виде уплотненных прослоев песка встречаются корни древесных растений, камни разных размеров окатанные и не окатанные (гравий, галька, мелкие валуны).</p>	<p>Сg. 70–95(105) см и ниже. Материнская порода. Ярко-бурый (5YR 4/6) с пятнами и затеками серо-сизой окраски (Gley1 6/10Y, около 20% площади), очень влажный до мокрого в нижней части; очень плотный, структура плитчатая, легкий суглинок; горизонт ожелезнен (обильные примазки), переход хорошо заметен по цвету, граница неровная.</p>

THE COMPOSITION OF ATMOSPHERIC DEPOSITION AND SOIL WATER IN THE MIXED FOREST OF THE PRIOKSKO-TERRACE STATE NATURE RESERVE

A. K. Khodzhaeva ^{1*}, D. V. Sapronov ¹, V. O. Lopez de Gerenyu ¹, N. B. Zinyakova ¹, D. A. Khoroshaev ¹, I. N. Kurganova ¹, V. A. Ableeva ²

¹*Institute of Physicochemical and Biological Problems in Soil Science of the Russian Academy of Sciences Institutskaya Street, 2, Pushchino, Moscow region, 142290, Russia*

²*Federal State Budget Institution «Prioksko-Terrasny State Natural Biosphere Reserve named after M. A. Zablotsky» Serpukhov Urban District, Danku locality, Moscow Region, 142200, Russia*

*E-mail: kodzhaeva@pbcras.ru

Received: 14.10.2024

Revised: 16.11.2024

Accepted: 18.12.2024

The paper presents the results of water sample collections during the spring-summer period of 2024 at the forest and open areas of the Prioksko-Terrasny State Nature Reserve. Significant variation in the main indicators of atmospheric deposition and soil water was observed. The export of dissolved organic carbon with soil water during the spring-summer period exceeded the input from atmospheric deposition. The carbon export from the upper 0-10 cm soil layer during the spring-summer period at the forest site was 0.3% of the reserves, while at the open (meadow) site it was 0.6%. The carbon export from the upper 0-20 cm soil layer during the spring-summer period at the forest site was 0.1% of the reserves, and at the open (meadow) site it was 0.2%. The results highlight the importance of monitoring atmospheric deposition and soil water for assessing the carbon balance in forest ecosystems.

Keywords: *mixed forest, Entic Umbric Podzol (Arenic), atmospheric deposition, soil water, dissolved organic carbon, dissolved total nitrogen*

Рецензент: д.б.н. Копчик Г. Н.