

ГЕНЕЗИС И ГЕОГРАФИЯ ПОЧВ

УДК 631.4

ОЦЕНКА ВЫНОСА УГЛЕРОДА С ПОЧВЕННЫМИ ВОДАМИ В ДОМИНИРУЮЩИХ ТИПАХ ЛЕСА БРЯНСКОГО ПОЛЕСЬЯ

© 2022 г. А. И. Кузнецова^{а, *}, А. В. Горнов^а, М. В. Горнова^а,
Д. Н. Тебенькова^а, А. Д. Никитина^а, В. А. Кузнецов^б

^аЦентр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН, ул. Профсоюзная, 84/32, стр. 14, Москва, 117997 Россия

^бМосковский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы, Москва, 119991 Россия

*e-mail: nasta472288813@yandex.ru

Поступила в редакцию 31.01.2022 г.

После доработки 15.03.2022 г.

Принята к публикации 30.03.2022 г.

Дана сравнительная оценка поступления органического углерода с атмосферными выпадениями и выноса растворенного органического углерода из почв хвойно-широколиственных лесов разного типа на почвообразующих породах песчаного гранулометрического состава. Объекты исследования — доминирующие типы хвойно-широколиственных лесов Брянского Полесья: сосняки кустарничково-зеленомошные, сосняки сложные бореально-неморальнотравные и полидоминантные широколиственные с елью неморальнотравные. В среднем за трехлетний период (2016–2019 гг.) наблюденный поступление углерода с дождевыми и снеговыми осадками в сосняках кустарничково-зеленомошных и сосняках сложных составляло 60 ± 4 кг С/(га год) и оказалось больше, чем в хвойно-широколиственных лесах, где уровень поступления составляет 47 ± 2 кг С/(га год). Вынос органического углерода из органогенных горизонтов в полидоминантных широколиственных лесах в среднем в 4 раза меньше (14 ± 4 кг С/(га год)), чем в сосняках кустарничково-зеленомошных, отличающихся мощной подстилкой (56 ± 22 кг С/(га год)), и в 2.5 раза меньше, чем в сосняках сложных (36 ± 12 кг С/(га год)). Случаи выноса органического углерода из нижних минеральных горизонтов для разных типов хвойно-широколиственных лесов оказались единичными и изменялись в среднем от 6 до 12 кг С/(га год). Внутривертикальное распределение растворенного органического углерода свидетельствует о более эффективной фиксации углерода в минеральной части почвенного профиля в сосновых лесах по сравнению с полидоминантными широколиственными лесами с елью.

Ключевые слова: заповедник “Брянский лес”, хвойно-широколиственные леса, атмосферные выпадения, лизиметрические воды, растворенный органический углерод, Albic Umbric Podzol

DOI: 10.31857/S0032180X2209012X

ВВЕДЕНИЕ

Растворенный органический углерод (РОУ) в почвах играет важную роль в биогеохимическом цикле углерода и в педогенезе. Перемещение РОУ из верхних горизонтов почв в более глубокие может приводить к стабилизации и, следовательно, к значительному увеличению депонирования углерода в почве [36]. Вынос РОУ с почвенными водами необходимо учитывать для характеристики как баланса углерода в наземных экосистемах [34], так и вклада выноса РОУ из почв в водные объекты [41]. Игнорирование этой составляющей цикла углерода приводит к некорректной оценке потоков углерода в лесах и занижению вклада лесных (и других наземных экосистем) в поступление органического углерода в водные экосистемы/океан. Так, глобальный вклад выноса углерода с почвенными водами в углеродный баланс наземных экосистем составляет более 15% от

экосистемной нетто продуктивности [41]. Локальные оценки в сосновых лесах умеренного пояса в Бельгии показали, что почвенный РОУ может составлять 11% от экосистемной нетто продуктивности [34]. Вклад выноса углерода с почвенными водами в лесных экосистемах Валдайского национального парка в поступление органического углерода в оз. Гусиное может достигать 8% от общего запаса углерода в водной экосистеме [5].

Экспериментальные измерения выноса углерода с почвенными водами в многолетней динамике в лесах России разных типов выполняются точно и не систематизированы. Многолетние (более 20 лет) измерения выноса соединений углерода с почвенными водами осуществляются в северо-таежных лесах Мурманской области [9, 10, 16]. Существуют оценки содержания углерода в почвенных водах за отдельные годы в среднета-

Таблица 1. Характеристика исследуемых типов леса

Показатель	Сосняк кустарничково-зеленомошный	Сосняк сложный	Полидоминантный широколиственный лес с елью
Координаты	52.55° N–34.04° E	52.53° N–34.01° E	52.54° N–34.05° E
Состав яруса А	9С1Б + Д	5С2Е2Б1Д + Кл + Лп + Ос	3Д3Кл3Лп1Е + В3 + Ос + Яс
Сомкнутость яруса А, %	50–70	70–90	60–90
Сомкнутость яруса В, %	10–30	30–60	40–60
Покрытие яруса С, %	30–70	30–70	60–80
Возраст, год	40–60	70–120	>120
Тип почв	Дерново-подзол иллювиально-железистый (Albic Umbric Podzol [43])		
Тип подстилки [4]	Ферментативная	Гумифицированная	Гумифицированная
Мощность подстилки, см	3–7	3–6	2–5
Мощность горизонта АУ, см	8–15	8–11	4–11
Мощность горизонта Е, см	6–10	9–22	17–49
Мощность горизонта ВF, см	20–40	20–29	25–40

ежных лесах Республики Карелия [30], Республики Коми [2, 20]. В сложных ельниках и смешанных хвойных лесах Московской области проводился четырехлетний мониторинг выноса углерода с почвенными водами [25]. Все эти исследования выполнены с применением методов, принятых в программе ICP Forests (www.icp-forests.org).

Анализ современных зарубежных и отечественных работ позволяет заключить, что оценка поступления соединений углерода с атмосферными выпадениями и их внутрипрофильной миграции является актуальной задачей в условиях возрастающего спроса на климаторегулирующие лесные экосистемные услуги [26].

Цель статьи – проанализировать величину поступления соединений углерода с атмосферными выпадениями и их миграцию с почвенными водами в доминирующих типах хвойно-широколиственных лесов европейской части России, формирующихся на легких почвообразующих породах.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объекты. Материал собран в юго-восточной части Брянского Полесья в пределах заповедника “Брянский лес”. Площадь заповедника составляет 12 тыс. га, охранной зоны – около 10 тыс. га. Более 80% этой территории покрыто лесами. В ботанико-географическом плане район относится к Полесской подпровинции Восточноевропейской провинции Европейской широколиственно-лесной области [23]. Заповедник и его охранная зона с давних времен и до введения охранного режима в 1987 г. подвергались рубкам и пожарам [8]. После нарушений обычно сажали сосну, поэтому современный лесной покров исследуемой территории представлен вторичными сообще-

ствами, среди которых на автономных позициях ландшафта широко распространены сосняки кустарничково-зеленомошные и сосняки сложные. Кроме того, здесь сохранились уникальные полидоминантные леса с елью. В ландшафтной структуре преобладают задровые местности. По данным ближайшей метеостанции г. Трубчевск (№ 26997) средняя годовая температура воздуха за период наблюдений с 2016 по 2019 г. составляет 7.8°C, среднегодовое количество осадков 397 мм [19]. В почвенном покрове преобладает дерново-подзол иллювиально-железистый [13] (Albic Umbric Podzol [43]) на флювиогляциальных отложениях. Ниже дана детальная характеристика этих лесов (табл. 1).

Сосняки кустарничково-зеленомошные преимущественно сформированы культурами, возраст которых составляет 40–60 лет. По классификации Заугольновой [28] – сосняки кустарничково-зеленомошные бореальнотравные. В древостое преобладает сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris*), иногда встречается береза пушистая (*Betula pubescens*), единично отмечен дуб черешчатый (*Quercus robur*). Подрост представлен березой пушистой, дубом черешчатым, елью европейской (*Picea abies*) и др. Среди кустарников отмечены крушина ломкая (*Frangula alnus*) и ракитник русский (*Chamaecytisus ruthenicus*). В травяном покрове доминируют бореальные кустарнички: брусника обыкновенная (*Vaccinium vitis-idaea*), вереск обыкновенный (*Calluna vulgaris*) и черника обыкновенная (*Vaccinium myrtillus*). Покрытие зеленых мхов высокое – 90%. В сосняках кустарничково-зеленомошных выделен один доминирующий элемент мозаики – сосна с кустарничками и бореальными травами.

Сосняки сложные представлены как культурами, так и естественными лесами, возраст которых 70–120 лет. По классификации Заугольной [28] – смешанные леса с сосной, елью, дубом и другие неморально-бореальнотравные. Сосна отмечена в древостое, но некоторые экземпляры выпадают. В ярусе деревьев высоко участие березы пушистой, дуба черешчатого и ели европейской, реже встречаются клен остролистный (*Acer platanoides*), липа сердцевидная (*Tilia cordata*) и осина обыкновенная (*Populus tremula*). В подросте высоко участие липы сердцевидной, меньше дуба черешчатого, ели европейской, клена остролистного, единично встречаются вяз голый (*Ulmus glabra*) и осина обыкновенная. Синюзия кустарников представлена крушиной ломкой и лещиной обыкновенной (*Corylus avellana*). В травяном ярусе преобладают неморальные растения: звездчатка жестколистная (*Stellaria holostea*), осока волосистая (*Carex pilosa*), осока пальчатая (*Carex digitata*) и др. Встречаются и бореальные травы: майник двулистный (*Maianthemum bifolium*), ожика волосистая (*Luzula pilosa*) и др. В связи с увеличением сомкнутости верхних ярусов покрытие напочвенных мохообразных уменьшается до 1–15%. В сосняках сложных также выделен один доминирующий элемент мозаики – сосна с неморальными и бореальными травами.

Старовозрастные малонарушенные леса сохранились лишь на небольших участках и представлены полидоминантными лесами с елью. По классификации Заугольной [28] – широколиственные леса с елью неморальнотравные. Эти леса представляют собой продвинутый этап формирования растительности при отсутствии антропогенных воздействий на протяжении длительного времени. Возраст сообществ более 120 лет. Ярус деревьев полидоминантный. В нем содоминируют дуб черешчатый, ель обыкновенная, клен остролистный, липа сердцевидная, вяз голый и ясень обыкновенный (*Fraxinus excelsior*). Полностью выпадает из древостоя сосна обыкновенная – раннесукцессионный вид. В подросте преобладают вяз голый, клен остролистный, липа сердцевидная, реже встречаются ель европейская, ясень обыкновенный и др. Кустарники представлены лещиной обыкновенной и черемухой обыкновенной (*Padus avium*). В травяном покрове доминируют неморальные растения: звездчатка жестколистная, осока волосистая, пролесник многолетний (*Mercurialis perennis*), сныть обыкновенная (*Aegopodium podagraria*) и др. Напочвенные мохообразные из-за нехватки светового довольствия не встречаются. В широколиственных лесах с елью выявлено четыре доминирующих элемента мозаики – дуб с неморальными травами, ель с неморальными травами, клен с неморальными травами и окна с неморальными травами, образованные вывалами старых деревьев.

Как в сосняках, так и в полидоминантных широколиственных лесах с елью формируются дерново-подзолы со сходным строением почвенного профиля: O–AY–(AYe)–E–(BFe)–BF(BHF)–C [11]. Подстилка всех типов леса дифференцируется на подгоризонты. В сосняках сложных и полидоминантных лесах с елью подстилка отличается меньшей мощностью, фрагментарностью ферментативного горизонта, наличием выраженного гумифицированного горизонта (табл. 1). Под лесной подстилкой формируется серогумусовый горизонт мощностью до 15 см. Под серогумусовым горизонтом в сосняках кустарничково-зеленомошных выделяется маломощный элювиальный горизонт E, который в некоторых случаях не диагностируется как чистый E горизонт, и выделяется как переходный AYe/BFe. В сосняках сложных и полидоминантных широколиственных лесах элювиальный горизонт мощнее (10–30 см), но зачастую турбированный и неоднородный. Как в сосновых, так и в широколиственных лесах ярко выражен горизонт BF (от 20 до 40 см).

Подробная физико-географическая, геоботаническая характеристика всех объектов исследования, а также описание морфологических и физико-химических характеристик почв представлены ранее [7, 11, 14].

Методы. В каждом типе леса заложены постоянные пробные площади размером 50 × 50 м. На пробных площадях выполнены таксационные и геоботанические описания, проведен отбор почвенных образцов, установлены гравитационные лизиметры, осадкоприемники для дождя и снега.

При геоботанических исследованиях заложены площадки размером 20 × 20 м. В каждом типе леса сделано по 11 описаний. На всех площадках составлен полный флористический список с учетом ярусной структуры леса. В каждом ярусе определено проективное покрытие видов по шкале Ж. Браун-Бланке (Braun-Blanquet, 1964, цит. по [18]). Латинские названия сосудистых растений даны по [17], классификация исследуемых лесов проводилась при помощи электронного определителя типов леса европейской России [28].

В каждом типе леса установлены осадкоприемники для дождя и снега и гравитационные лизиметры под тремя почвенными горизонтами в доминирующих подкروновых элементах мозаики: O (глубина установки 5 см), AY (глубина установки 15 см) и E (глубина установки 50 см) – для полидоминантных широколиственных лесов с елью, O (глубина установки 5 см), AY (глубина установки 15 см) и BF (глубина установки 50 см) – для сосновых лесов. Поскольку в широколиственном лесу выделены окна как элемент мозаики, в них дополнительно устанавливались по 2 осадкоприемника и по 1 гравитационному лизиметру

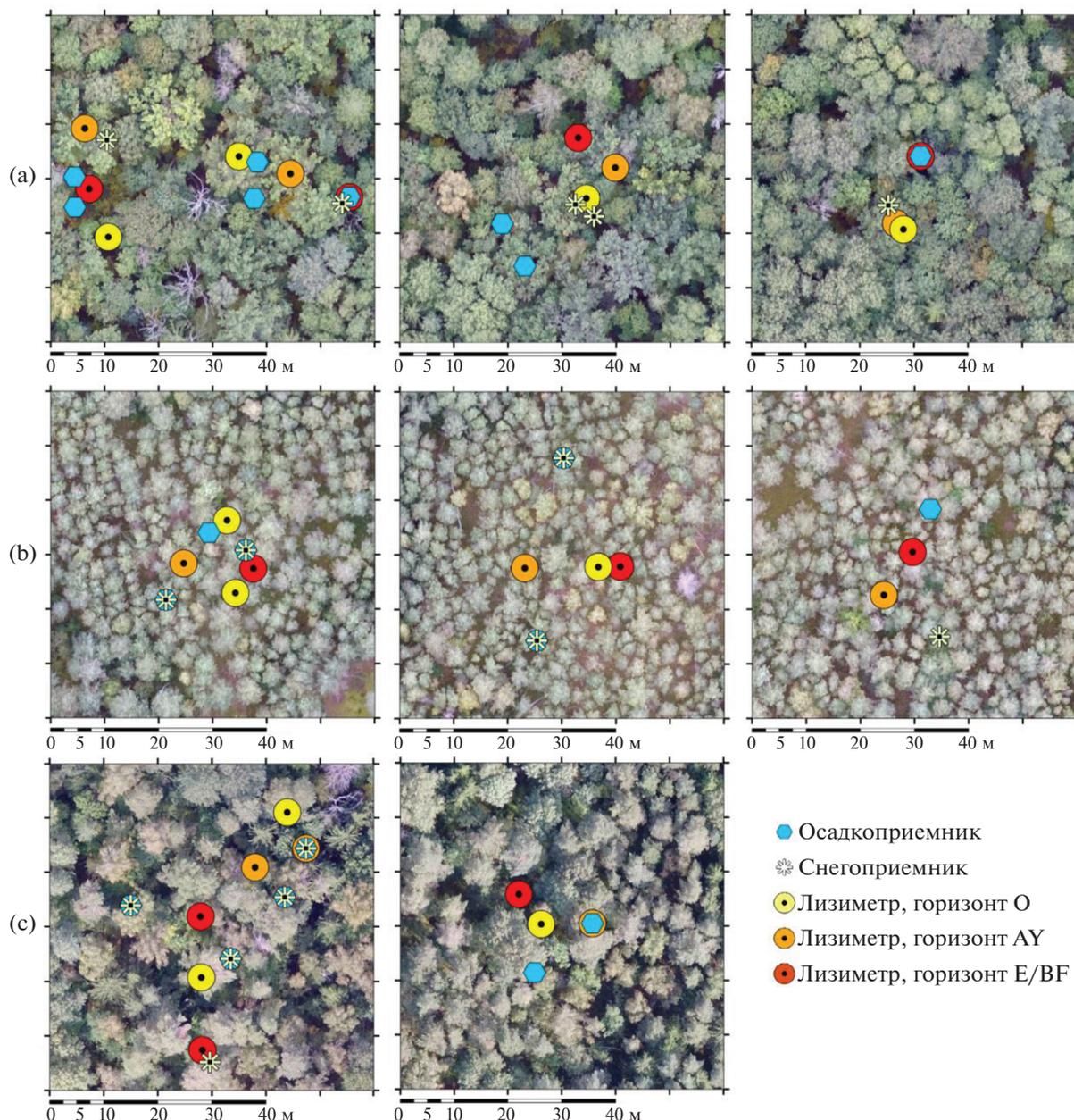


Рис. 1. Схема расположения снегоприемников, осадкоприемников и почвенных лизиметров на объектах исследования. Обозначения: а – полидоминантный лес с елью, б – сосняк кустарничково-зеленомошный, с – сосняк сложный.

под тремя почвенными горизонтами: О, АУ и Е (рис. 1).

Для оценки атмосферных выпадений – совокупного объема мокрых и сухих выпадений, в состав которых входят как органические вещества, мигрирующие в атмосфере, так и продукты взаимодействия осадков и крон деревьев, использовали снегоприемники (15 шт.) и осадкоприемники (20 шт.). Основные характеристики снегоприемников: диаметр пластикового кольца: 30 см; высота конструкции – 150 см; приемники атмо-

сферных выпадений: полиэтиленовый пакет вместимостью до 50 л. Снегоприемники улавливают все осадки в зимний период с конца октября по апрель. Основные характеристики осадкоприемников: диаметр воронки: 15 см; высота пластиковой трубы – 100 см; приемники атмосферных вод – полиэтиленовые пакеты вместимостью до 3 л. Для оценки выноса углерода с почвенными водами под кронами доминирующих древесных растений и в окнах заложено 30 гравитационных почвенных лизиметра конструкции Дерома [22]. Основные характеристики лизиметров: диаметр

воронки – 20 см; мощность дренажного слоя – 15 см; состав дренажа – полиэтиленовая крошка диаметром 3–5 мм; приемники фильтрата – полиэтиленовые бутылки, объемом 2.0 л.

Учеты в вегетационный сезон производили ежемесячно. В период с ноября по март пробные площади не доступны из-за снежного покрова, поэтому в зимний период вода накапливалась в коллекторы и отборы проводили однократно по истечении этого периода.

Для проведения физико-химических анализов отбирали пробу воды объемом не менее 500 мл, которую замораживали. Различия в объеме атмосферных выпадений и почвенных вод могут быть одной из причин варьирования концентраций химических веществ. Один из способов стандартизации результатов, предотвращающий возникновение очень высоких концентраций в ситуациях с малым количеством воды или, наоборот, эффектов разбавления, которые являются обычными для очень интенсивных дождей – использование средневзвешенных значений. Поэтому анализировали средневзвешенную пробу, полученную путем смешивания индивидуальных образцов с учетом соотношений в объемах, измеренных в полевых условиях. Потоки углерода получены как произведение концентраций этих средневзвешенных проб и соответствующих объемов поступлений.

При отборе и хранении образцов использовали критерии, предложенные в Руководстве UNECE-CLRTAP ICP по лесам [31]. Анализировали данные за трехлетний период: 1 – с ноября 2016 г. по ноябрь 2017 г., 2 – с ноября 2017 г. по ноябрь 2018 г., 3 – с ноября 2018 г. по ноябрь 2019 г. К зимнему периоду относится период с декабря по март, к вегетационному – с апреля по октябрь, из этого периода выделяли весенний – с апреля по май, летний – с июня по август и осенний – с сентября по ноябрь. Все пробы после размораживания фильтровали через мембранный фильтр M-Millipore с диаметром пор 0.45 мкм, что позволило учесть РОУ. Содержание РОУ определяли методом термокаталитического окисления с бездисперсионной ИК-регистрацией на анализаторе общего углерода/азота ТОС-V_{СРН}.

Потоки углерода (поступление с атмосферными выпадениями, поглощение и вынос углерода) определялись на основе разности массы элемента [5]. Для оценки поглощения/выноса углерода в подстилке в качестве приходной составляющей использовали массу элемента в атмосферных выпадениях, расходной – массу элемента в подстилочных лизиметрических водах (О); поглощение/вынос углерода в гумусовом горизонте – разница масс элементов в подстилочных лизиметрических водах и водах, прошедших гумусовый горизонт (АУ) почв; для нижних минеральных горизонтов – разницу масс элементов в лизиметрических водах, прошед-

ших гумусовый горизонт почв, и Е/ВF горизонт. Оценка поглощения углерода балансовым способом может быть завышена, поскольку не учитывает соотношение между процессами накопления углерода в горизонте и его использования биотой с последующей минерализацией.

Для определения запасов подстилки в каждом типе леса не менее чем в десятикратной повторности отбирали подстилку с использованием рамки размером 0.25 × 0.25 м. В лабораторных условиях образцы высушивали до сухого состояния при 105°C и взвешивали.

Статистическую обработку результатов проводили с использованием пакета STATISTICA ($\alpha = 0.1$). Для проверки значимости различий среднего использован непараметрический критерий Манна-Уитни. Сравнивали характеристики полидоминантных широколиственных лесов с елью с сосняками кустарничково-зеленомошными и сосняками сложными (табл. 2, 3).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Концентрации РОУ в атмосферных выпадениях и в почвенных водах. Концентрации РОУ в атмосферных выпадениях была значительно меньше ($p < 0.001$), чем в почвенных водах и составляла в среднем 17.4 ± 1.2 мг С/л против 72.5 ± 4.4 мг С/л, 69.0 ± 6.4 мг С/л и 70.5 ± 10.3 мг С/л в почвенных водах, прошедших через подстилку, гумусовый горизонт и ВF горизонт соответственно. Как и следовало ожидать, максимальная концентрация РОУ отмечена в подстилочных водах. Средняя годовая концентрация РОУ в атмосферных выпадениях значительно меньше в полидоминантных широколиственных лесах с елью, за счет вклада окон, где отмечено самое низкое содержание РОУ (табл. 2).

При значительной вариабельности концентраций РОУ в подстилочных водах можно отметить более высокую концентрацию РОУ в почвенных водах сосняков кустарничково-зеленомошных, что особенно ярко проявляется при учете сезонных отборов. Источником для РОУ в сосновых лесах является мощная, развитая подстилка, отличающаяся низким качеством опада. Запасы подстилки (горизонт О) в сосняках кустарничково-зеленомошных составляют 2.5 ± 0.2 кг/м², в сосняках сложных – 2.1 ± 0.2 кг/м², в то время как в полидоминантных широколиственных с елью – 1.4 ± 0.1 кг/м². В сложных сосняках также отмечена высокая концентрация РОУ с максимумом в осенний период по сравнению с летним ($p < 0.005$).

При анализе воды, прошедшей через АУ и Е/ВF горизонты, установлено, что в полидоминантных широколиственных лесах с елью вынос углерода из нижних горизонтов отмечается еди-

Таблица 2. Концентрации РОУ в природных водах (мг С/л) разных типов леса в период 2016–2019 гг.

Тип леса (объем выборки <i>n</i>)	Зима	Весна	Лето	Осень	Год
Атмосферные выпадения					
1 (47)	5.2 ± 2.1	18.8 ± 2.5	18.2 ± 2.4***	25.3 ± 5.2	18.8 ± 1.9***
2 (41)	4.9 ± 0.6	24.4 ± 1.9*	18.8 ± 2.0***	31.6 ± 4.5*	21.5 ± 1.9***
3 (78)	3.4 ± 0.8	12.6 ± 3.5	12.1 ± 1.3	25.5 ± 7.3	14.3 ± 1.9
Подстилочные (О) воды					
1 (34)	86.5 ± 18.0	143.0 ± 42.0	84.2 ± 18.4	61.8 ± 14.4*	84.1 ± 11.9
2 (29)	93.0 ± 34.0	96.3 ± 24.6	56.5 ± 5.4	113.0 ± 18.9**	76.2 ± 7.4
3 (35)	102	66.5 ± 8.5	61.8 ± 6.1	49.4 ± 5.6	59.7 ± 4.4
Почвенные воды, прошедшие гумусовый горизонт (АУ)					
1 (28)	67.0 ± 24.0	65.0 ± 18.0	78.2 ± 18.1	70.0 ± 11.7	75.0 ± 12.5
2 (21)	25	86.5 ± 16.5	49.5 ± 4.6	44.8 ± 5.5	51.0 ± 4.4
3 (17)	58	54.0	69.5 ± 19.6	113.0	70.5 ± 16.3
Почвенные воды, прошедшие Е/BF горизонт					
1 (12)	91	91.0 ± 60.0	62.4 ± 17.4	72.5 ± 7.5	71.2 ± 12.8
2 (5)	67	40.0	50.0 ± 4.0	44	51.8 ± 5.8
3 (12)	–	35.6 ± 16.4	80.7 ± 32.7	–	70.1 ± 24.9

Примечание. 1 – сосняк кустарничково-зеленомошный; 2 – сосняк сложный; 3 – полидоминантный широколиственный лес с елью; среднее ± ошибка среднего; * $p < 0.1$; ** $p < 0.01$; *** $p < 0.001$.

Таблица 3. Потоки углерода (кг С/га), характеризующие разницу между поступлением соединений углерода с атмосферными выпадениями и их выносом с почвенными водами в период 2016–2019 гг.

Тип леса	Зима	Весна	Лето	Осень	Год
Поглощение (положительные значения) или вынос (отрицательные значения) из горизонта О					
1	–10.9 ± 13.6	1.7 ± 3.9	9.9 ± 7.8	2.7 ± 5.6	3.3 ± 26.1
2	6.2 ± 1.4	6.9 ± 3.9	12 ± 5.1	–0.8 ± 7.6	24.3 ± 15.6
3	6.3 ± 1.2	10 ± 1.8	7.6 ± 1.1	9.8 ± 6.9	33.8 ± 4.7
Поглощение (положительные значения) или вынос (отрицательные значения) из гумусового горизонта АУ					
1	13.4 ± 12.4	6.3 ± 1.8	–10.9 ± 15.3	–2.4 ± 9.2	6.4 ± 31.4
2	0.1 ± 0.7	6.7 ± 1.4	4 ± 2.5	9.7 ± 10.1	20.6 ± 13.2
3	0.3 ± 0.3	2 ± 1.4	3.4 ± 1.8	1.7 ± 0.6	7.3 ± 2.2
Поглощение (положительные значения) или вынос (отрицательные значения) из горизонта Е/BF					
1	4.5 ± 2.7	5.4 ± 1.4*	18.4 ± 6*	10.3 ± 6.6*	38.6 ± 6.1*
2	0.3 ± 1.2	–3.1 ± 3.4*	10.4 ± 3.4*	2.2 ± 1.7*	9.8 ± 2.1*
3	–	–5 ± 5	1.2 ± 0.4	0.1 ± 0	–3.7 ± 5.2

Примечание. 1 – сосняк кустарничково-зеленомошный ($n = 3$); 2 – сосняк сложный ($n = 3$); 3 – полидоминантный широколиственный лес с елью ($n = 3$); среднее ± ошибка среднего; * $p < 0.1$.

нично. В сосняках кустарничково-зеленомошных концентрация РОУ в водах, прошедших BF горизонт, незначительно уменьшается в летний период или в среднем остается без изменения в весенне-осенний период по сравнению с водами из гумусового горизонта. В сосняках сложных в вегетационный период (весна, лето, осень) вынос из нижних минеральных горизонтов отмечается единично,

также можно отметить тенденцию к уменьшению концентрации РОУ.

Сезонная динамика потоков углерода в атмосферных выпадениях и почвенных водах. Поступление органического углерода с атмосферными выпадениями больше в летний сезон во всех типах леса за счет высоких концентраций, и объе-

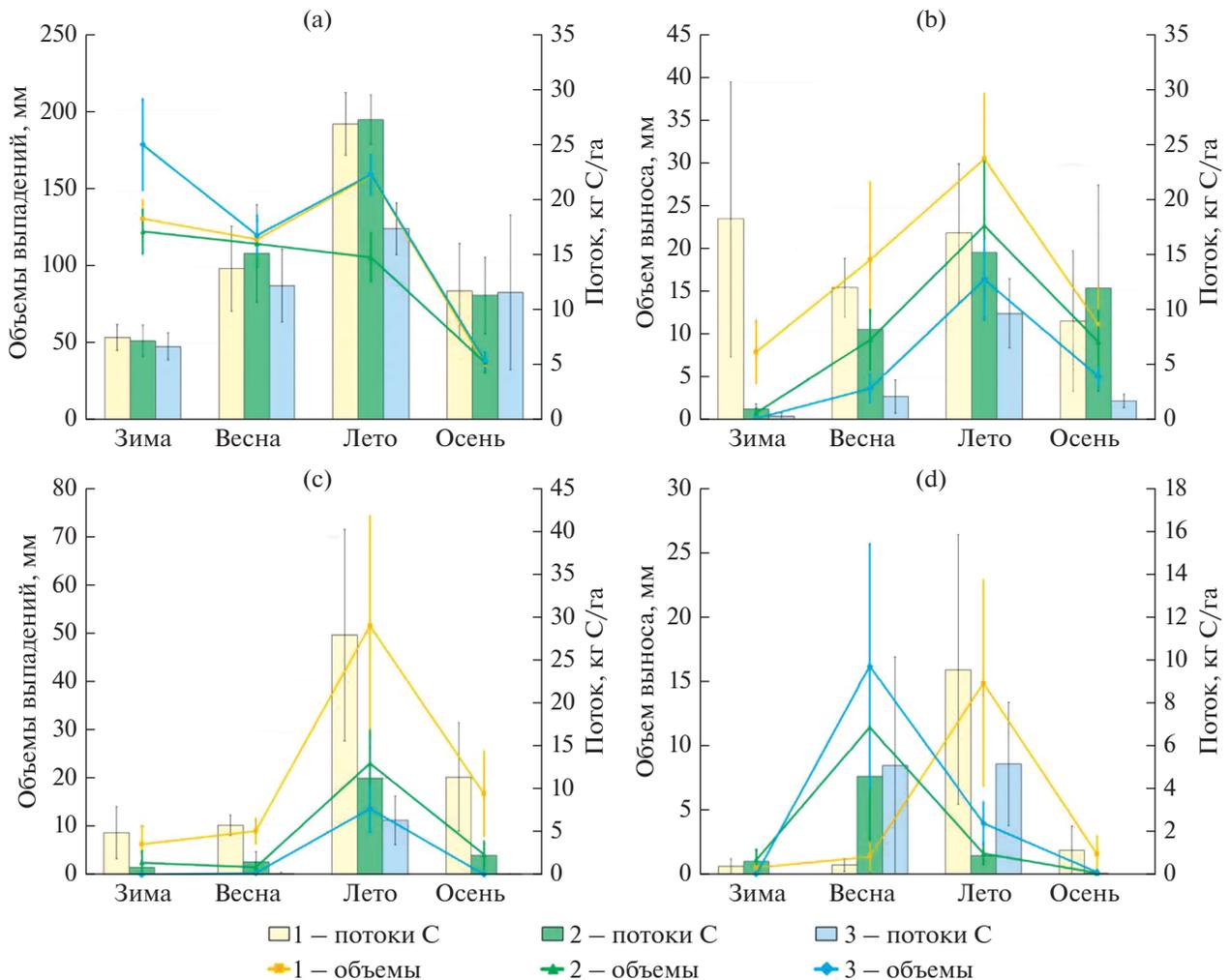


Рис. 2. Сезонное поступление углерода с атмосферными осадками и вынос углерода с почвенными водами (столбцы – кг С/га) и количество атмосферных выпадений и почвенных вод (линии – мм) в разных типах леса среднее по сезону (2016–2019 гг.) Обозначения: а – атмосферные выпадения, б – горизонт O, с – горизонт АУ, d – горизонт E/BF; типы леса: 1 – сосняк кустарничково-зеленомошный, 2 – сосняк сложный, 3 – полидоминантный широколиственный лес с елью.

мов (рис. 2а). Максимальное количество осадков характерно для сосняка кустарничково-зеленомошного, минимальное – для сосняка сложного, особенно в летний период ($p < 0.08$). Средние объемы выпадений в полидоминантных широколиственных лесах с елью и сосняках кустарничково-зеленомошных сопоставимы.

Вынос углерода из органогенных горизонтов в полидоминантных широколиственных лесах в летний период в 30 и более раз больше, чем в зимний период ($p < 0.08$), и почти в 5 раз больше, чем в весенний и осенний периоды ($p < 0.08$) (рис. 2б). Вынос углерода из подстилки сосняков сложных в зимний период в 16 раз меньше, чем в другие периоды вегетационного сезона ($p < 0.08$) также в основном за счет малых объемов почвенных вод и незначительного поступления соединений углерода с атмосферными выпадениями. Варьирова-

ние выноса соединений углерода с водами из органогенных горизонтов в сосняках кустарничково-зеленомошных было значительным и в среднем не различалось в разные сезоны. Оценка поглощения углерода в подстилке на основании разницы поступления углерода и его выноса показывает, что в полидоминантных широколиственных лесах происходит круглогодичное поглощение углерода в подстилке, в то время как в сосновых лесах наблюдается вынос углерода в нижние горизонты в зимний или осенний периоды (табл. 3).

Вынос углерода из гумусового горизонта во всех типах леса в летний период значительно больше, чем в другие периоды ($p < 0.08$), в основном за счет максимальных объемов почвенных вод (рис. 2с). Оценка поглощения углерода в гумусовом горизонте показывает, что в сосняках кустарничково-зеленомошных почти ничего не на-

капливается за счет активного выноса в летний сезон. В сосняках сложного поглощение происходит круглогодично, с максимумом в осенний сезон.

Вынос углерода из нижних минеральных горизонтов в сосняках кустарничково-зеленомошных в летний период был в 20 и более раз больше, чем в зимний и весенний, также в основном за счет больших объемов почвенных вод и значительного поступления углерода с атмосферными выпадениями (рис. 2d). При этом накопление углерода в нижних минеральных горизонтах в сосняках кустарничково-зеленомошных происходит круглогодично ($p < 0.08$). Вынос углерода с почвенными водами из нижних минеральных горизонтов в полидоминантных широколиственных лесах с елью и сосняках сложного не отличается в разные сезоны (рис. 2d). В сосняках сложного углерод накапливается в основном в летний сезон, в то время как в зимний и весенний — преобладают процессы выноса. В полидоминантных широколиственных лесах с елью поглощение минимальное по сравнению с другими типами леса ($p < 0.08$), то есть практически не происходит, с отрицательным балансом в весенний период ($p < 0.08$).

Оценка годовых потоков углерода в атмосферных выпадениях и почвенных водах. В среднем за трехлетний период (2016–2019 гг.) наблюдений поступление углерода с промывающими полог дождевыми и снеговыми осадками в сосняках кустарничково-зеленомошных и сосняках сложного составляло 60 ± 4 кг С/(га год) и оказалось больше, чем в полидоминантных лесах, где уровень поступления составляет 47 ± 2 кг С/(га год). В сосновых лесах годовой уровень поступления соединений углерода значительно больше ($p < 0.08$), чем в полидоминантных широколиственных лесах с елью за счет более высоких концентраций (табл. 2).

Годовой вынос углерода с подстилочными водами в сосняках кустарничково-зеленомошных составил 56 ± 22 , в сосняках сложного — 36 ± 12 , в хвойно-широколиственных лесах отмечен минимальный вынос углерода ($p < 0.08$) — 14 ± 4 кг С/(га год). Годовой вынос углерода с почвенными водами, прошедшими подстилку и гумусовый горизонт, в сосняках кустарничково-зеленомошных составил 50 ± 11 , в сосняках сложного — 16 ± 3 , в хвойно-широколиственных лесах — 7 ± 3 кг С/(га год).

Случаи выноса органического углерода из нижних минеральных горизонтов для подзоны хвойно-широколиственных лесов оказались единичными и сопоставимыми во всех типах леса. В среднем за трехлетний период наблюдений среднегодовой вынос углерода с почвенными водами за пределы почвенного профиля в сосняках кустарничково-зеленомошных составил 12 ± 6 , в сосняках сложного — 6 ± 5 , в хвойно-широколиственных лесах — 10 ± 7 кг С/(га год).

ОБСУЖДЕНИЕ

Влияние типов леса на потоки РОУ в атмосферных выпадениях и их внутрипрофильную миграцию с почвенными водами. На поступление органического углерода с атмосферными выпадениями влияет древесный полог молодого сосняка кустарничково-зеленомошного, который отличается ажурностью, что способствует проникновению большого количества осадков, а также формированию значительного объема ствольных вод [15]. В более смешанных лесах (сосняках сложного), формируемых древостоем старшего возраста, более сомкнутый полог, особенно во время пика развития ассимиляционного аппарата (в летний сезон), способствует значительному уменьшению объема атмосферных вод, проникающих сквозь кроны деревьев, по сравнению с другими типами леса. В полидоминантных широколиственных лесах с елью сомкнутость полога достигает максимальных значений, однако за счет вклада окон средние объемы выпадений сопоставимы с сосняком кустарничково-зеленомошным. Разница в потоках РОУ между типами леса обусловлена в основном содержанием РОУ. Концентрации РОУ в атмосферных выпадениях в разных типах леса демонстрируют высокую вариабельность, что связано со строением крон и структурным разнообразием сообщества (количество элементов мозаики растительного покрова). Сокращение потока углерода в межкрупных пространствах за счет уменьшения концентрации РОУ характерно для лесных экосистем [9]. Высокое содержание РОУ в атмосферных выпадениях сосновых лесов также отмечалось в ряде работ, где значительное содержание углерода в атмосферных выпадениях хвойных лесов объяснялось шероховатостью поверхности [1, 25].

Выщелачивание РОУ из лесной подстилки — один из основных путей миграции углерода в нижние горизонты почвы [33]. Растворенное органическое вещество, мигрирующее из верхних горизонтов почв, может фиксироваться в них, что приводит к увеличению депонирования С в почве [36].

Вынос органического углерода из органогенных горизонтов в полидоминантных широколиственных лесах в среднем в 4 раза меньше, чем в сосняках кустарничково-зеленомошных и в 2.5 раза меньше, чем в сосняках сложного, за счет как небольших объемов выпадений, так и низких концентраций.

На поток РОУ подстилки могут влиять и такие свойства растительности, как количество и качество опада, определяющие основные свойства органогенных горизонтов почв. Связи запасов подстилки и концентрации РОУ были отмечены и ранее: для лесов с более развитой подстилкой и

низкой долей участия лиственных деревьев характерен более интенсивный вынос РОУ [33].

Результаты других исследований показывают, что смешивание медленно разлагаемой подстилки с низким качеством опада с быстро разлагаемой подстилкой, формируемой опадом высокого качества, способствует более интенсивному переносу углерода в минеральные горизонты почв [32, 38], в основном за счет увеличения потока РОУ из развитой подстилки, с одной стороны [33], и добавления доступного азота быстро разлагаемых фракций опада, с другой. Такой тип подстилки характерен для сосняков сложных, где также отмечены высокие концентрации РОУ, которые демонстрируют максимум в осенний период по сравнению с летним, когда, как известно, запасы подстилки достигают пика из-за проходящего листопада [24]. Это подтверждают и данные о большом содержании азота в подстилке лесов этого типа – 1.9%, в то время как в сосняках кустарничково-зеленомошных этот показатель составляет 1.4% [37].

Таким образом, полидоминантные леса характеризуются достаточно активным поступлением соединений углерода с атмосферными выпадениями и слабой интенсивностью его выноса с почвенными водами, что позволяет сделать вывод о интенсивном накоплении и использовании углерода в органогенных горизонтах, что, вероятно, связано с уровнем биоразнообразия, то есть высокими показателями видовой насыщенности [7] и биомассы почвенных макросaproфагов [6]. Таким образом, круговорот в этом типе леса более замкнут, более интенсивен.

Значительные потоки РОУ в сосновых лесах обусловлены большими запасами подстилки и поступлением углерода с атмосферными выпадениями. Меньшая биологическая активность, обусловленная незначительным по сравнению с полидоминантными лесами биоразнообразием и массой биоты, может способствовать выносу поступивших с атмосферными выпадениями соединений углерода из экосистемы. Максимальный вынос органического углерода отмечен в сосняках кустарничково-зеленомошных, что указывает на самый низкий уровень поглощения воды и органических соединений в сосняках кустарничково-зеленомошных, на менее интенсивный биологический круговорот в них.

Концентрация РОУ в почвенных водах, прошедших гумусовый горизонт, во всех типах леса превышает 35 мг С/л. Это может свидетельствовать о высоком потенциале фиксации соединений углерода в нижних минеральных горизонтах, то есть его сорбции горизонтом ВF, что было показано в ряде лабораторных экспериментов для еловых лесов европейской части России [12]. Уменьшение внутривершинной концентрации

РОУ в сосновых лесах может свидетельствовать о закреплении части углерода в минеральной части профиля. Оценка поглощения углерода в почвах сосняков сложных показывает, что в осенний период происходит более интенсивное накопление углерода в гумусовом горизонте почв, в то время как в сосняках кустарничково-зеленомошных накопление интенсивнее в нижних горизонтах почв. Это подтверждают данные о самых больших запасах углерода в слое 0–50 см в сосняках сложных – 57 и 48 т/га в сосняках кустарничково-зеленомошных [37].

Характеристика общих пулов и потоков углерода в лесных экосистемах Брянского Полесья. Более продуктивные сообщества полидоминантных широколиственных лесов отличаются самыми высокими запасами стволовой древесины: 228.8 т/га против 216.8 и 120.1 т/га в сосняках сложных и сосняках кустарничково-зеленомошных соответственно [1]. Почвенный пул углерода, включающий подстилку и минеральный слой 0–50 см, варьирует от 16% в полидоминантных широколиственных лесах с елью до 32% в сосняках кустарничково-зеленомошных от общего пула углерода экосистем (почвы + биомасса).

Общая продукция надземной и подземной частями растений в сосновых лесах составляет 6–8 т С/(га год) [3]. Полидоминантные широколиственные леса могут продуцировать до 10 т С/(га год) [3]. Средние скорости накопления почвенного углерода равны 0.95 ± 0.12 т С/(га год) в аналогичных хвойно-широколиственных лесах Германии [35] и $0.55–0.73$ т С/(га год) в лесах Бельгии [39].

Для лесов, развивающихся в сходных природно-климатических условиях, основным источником поступления углерода является опад, а основным процессом потери соединений углерода из экосистемы – эмиссия в атмосферу [21]. Годовое количество опада в таких лесах варьирует от 3.1 до 4.4 т С/(га год) [29], в то время как величина эмиссии в среднем составляет 3.2 т С/(га год) [40]. Таким образом величины этих потоков сопоставимы.

Наибольший вынос углерода с почвенными водами характерен для хвойных лесов, особенно сосновых [9, 15, 33]. Оценки выноса потоков РОУ из сосновых лесов умеренного пояса в Бельгии составляют около 100 кг С/(га год) [34]. По другим оценкам вынос углерода в сосновых лесах Северной Бельгии за период с 2002 по 2012 г. составляет 55–61 кг С/(га год) [42]. В сосновых лесах Брянского Полесья вынос РОУ практически в 5–10 раз меньше (6–12 кг С/(га год)), что может быть связано с менее гумидными климатическими условиями в этом регионе. Учитывая широкое распространение сосновых лесов на северо-западе европейской части России (до 20% от покры-

той лесом площади по [27]), суммарный вынос углерода из экосистем с почвенными водами может быть значительным. По сравнению с сосновыми лесами величина выноса почвенного углерода в широколиственных лесах значительно меньше — в лесах Брянского Полесья вынос составлял 10, в дубово-буковых лесах Северной Бельгии 19–30 кг С/(га год) [42].

Таким образом, вклад выноса РОУ с почвенными водами, основанный на доле выноса от скорости накопления С в минеральных горизонтах почв, составляет от 2% при выносе 6–12 кг С/(га год) до 14% при выносе 50–100 кг С/(га год).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Дана сравнительная оценка поступления органического углерода с атмосферными выпадениями и выноса растворенного органического углерода из почв хвойно-широколиственных лесов разного типа на почвообразующих породах песчаного гранулометрического состава. Показано, что в разных типах леса поступление соединений углерода с атмосферными выпадениями и их внутрипрофильная миграция с почвенными водами тесно связана со строением крон, перераспределяющих осадки, с качеством и количеством опада, определяющими запасы подстилки.

В среднем за трехлетний период (2016–2019 гг.) наблюдений среднегодовое поступление углерода с атмосферными выпадениями в сосняках кустарничково-зеленомошных и сосняках сложных составляло 60 ± 4 кг С/(га год) и оказалось больше, чем в хвойно-широколиственных лесах, где уровень поступления составляет 47 ± 2 кг С/(га год).

Вынос органического углерода из органических горизонтов в среднем в 4 раза больше в сосняках кустарничково-зеленомошных (56 ± 22 кг С/(га год)) и в 2.5 раза больше в сосняках сложных (36 ± 12 кг С/(га год)) по сравнению с полидоминантными широколиственными лесами (14 ± 4 кг С/(га год)). Это связано как с большей концентрацией РОУ в почвенных водах сосновых лесов, обусловленной мощной подстилкой, так и с высоким уровнем поступления углерода с атмосферными выпадениями. Случаи выноса органического углерода из нижних минеральных горизонтов оказались единичными: в сосняках кустарничково-зеленомошных вынос составлял 12 ± 6 , в сосняках сложных — 6 ± 5 , в полидоминантных лесах — 10 ± 7 кг С/(га год).

Внутрипрофильное распределение РОУ свидетельствует о закреплении части углерода в минеральной части профиля в сосновых лесах.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы выражают благодарность чл.-корр. РАН, д. б. н., проф. Н.В. Лукиной за идею данного исследо-

вания и содействие на всех этапах проведения, а также сотрудникам заповедника “Брянский лес” за помощь в организации полевых работ.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено в рамках темы ГЗ ЦЭПЛ РАН № АААА-А18-118052590019-7 (анализ данных), а также при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-34-90137 (формирование баз данных наземных обследований).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аккумуляция углерода в лесных почвах и сукцессионный статус лесов / Под ред. Н.В. Лукиной. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2018. 232 с.
2. Арчегова И.Б., Кузнецова Е.Г. Влияние древесных растений на химический состав атмосферных осадков в процессе восстановления среднетажных лесов // Лесоведение. 2011. № 3. С. 34–43.
3. Базилевич Н.И. Биологическая продуктивность экосистем северной Евразии. М.: Наука, 1993. 293 с.
4. Богатырев Л.Г. О классификации лесных подстилок // Почвоведение. 1990. № 3. С. 118–127.
5. Гашкина Н.А., Моисеенко Т.И., Дину М.И., Тацый Ю.Г., Баранов Д.Ю. Биогеохимическая миграция элементов в системе атмосферные осадки–крупные воды–почвенные воды–озеро в фоновом регионе (Валдайский национальный парк) // Геохимия. 2020. Т. 65. № 7. С. 693–710. <https://doi.org/10.31857/S0016752520050027>
6. Гераськина А.П. Влияние дождевых червей разных морфо-экологических групп на аккумуляцию углерода в лесных почвах // Вопросы лесной науки. 2020. Т. 3. № 2. С. 1–20. <https://doi.org/10.31509/2658-607x-2020-3-2-1-20>
7. Горнов А.В., Горнова М.В., Тихонова Е.В., Шевченко Н.Е., Кузнецова А.И., Ручинская Е.В., Тебенькова Д.Н. Оценка сукцессионного статуса хвойно-широколиственных лесов европейской части России на основе популяционного подхода // Лесоведение. 2018. № 4. С. 1–15. <https://doi.org/10.1134/S0024114818040083>
8. Евстигнеев О.И. Неруссо-Деснянское Полесье: история природопользования. Брянск, 2009. 139 с.
9. Ершов В.В. Фитогенное варьирование состава атмосферных выпадений и почвенных вод северотаежных лесов в условиях аэротехногенного загрязнения. Дис. ... канд. биол. н. Апатиты, 2021. 188 с.
10. 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 выбро-

- сами медно-никелевого комбината // Сибирский экологический журн. 2019. Т. 26. № 1. С. 119–132.
11. Казакова А.И., Семиколенных А.А., Горнов А.В., Горнова М.В., Лукина Н.В. Влияние растительности на лабильные характеристики лесных почв задровых местностей заповедника “Брянский лес” // Вестник Моск. ун-та. Сер. 17. Почвоведение. 2018. № 3. С. 9–15.
 12. Караванова Е.И., Золовкина Д.Ф., Степанов А.А. Взаимодействие водорастворимых органических веществ хвойной подстилки с минералами и горизонтами подзолистой почвы и подзолов // Почвоведение. 2020. № 9. С. 1071–1084. <https://doi.org/10.31857/S0032180X20090075>
 13. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
 14. Кузнецова А.И., Лукина Н.В., Тихонова Е.В., Горнов А.В., Горнова М.В., Смирнов В.Э., Гераськина А.П., Шевченко Н.Е., Тебенькова Д.Н., Чумаченко С.И. Аккумуляция углерода в песчаных и суглинистых почвах равнинных хвойно-широколиственных лесов в ходе восстановительных сукцессий // Почвоведение. 2019. № 7. С. 803–816. <https://doi.org/10.1134/S0032180X19070086>
 15. Лукина Н.В., Еришов В.В., Горбачева Т.Т., Орлова М.А., Исаева Л.Г., Тебенькова Д.Н. Оценка состава почвенных вод северотаежных хвойных лесов фоновых территорий индустриально развитого региона // Почвоведение. 2018. № 3. С. 284–296. <https://doi.org/10.7868/S0032180X18030036>
 16. Лукина Н.В., Никонов В.В. Питательный режим лесов северной тайги: природные и техногенные аспекты. Апатиты: Изд-во Кольского научного центра РАН, 1998. 316 с.
 17. Маевский П.Ф. Флора средней полосы европейской части России. М., 2014. 635 с.
 18. Миркин Б.М., Розенберг Г.С., Наумова Л.Г. Словарь понятий и терминов современной фитоценологии. М.: Наука, 1989. 223 с.
 19. ООО “Расписание Погоды”, 2004–2022 [Электронный ресурс]. <https://rp5.ru/> (дата обращения 15.03.2022)
 20. Пристова Т.А., Забоева И.В. Химический состав атмосферных осадков и лизиметрических вод подзола иллювиально-железистого под хвойно-лиственными насаждениями (Республика Коми) // Почвоведение. 2007. № 12. С. 1472–1481.
 21. Пулы и потоки углерода в наземных экосистемах России / Под ред. Г.А. Заварзина. М.: Наука, 2007. 315 с.
 22. Рассеянные элементы в бореальных лесах / Отв. ред. А.С. Исаев. М.: Наука, 2004.
 23. Растительность европейской части СССР. Л.: Наука, 1980. 431 с.
 24. Семенюк О.В., Телеснина В.М., Богатырев Л.Г., Бенедиктова А.И. Использование особенностей структурно-функциональной организации подстилок для оценки интенсивности круговорота в городских насаждениях (на примере Москвы) // Почвоведение. 2021. № 5. С. 592–605. <https://doi.org/10.31857/S0032180X21050178>
 25. Султанбаева Р.Р., Копчик Г.Н., Смирнова И.Е., Копчик С.В. Поступление и миграция растворимого органического углерода в почвах лесных экосистем подзоны широколиственно-хвойных лесов // Вестник Моск. ун-та. Сер. 17. Почвоведение. 2015. № 4. С. 37–42.
 26. Тебенькова Д.Н., Лукина Н.В., Данилова М.А., Кузнецова А.И., Горнов А.В., Шевченко Н.Е., Катаев А.Д., Газарин Ю.Н., Чумаченко С.И. Мультифункциональность и биоразнообразие лесных экосистем // Лесоведение. 2019. № 5. С. 341–356.
 27. Уткин А.И., Замолодчиков Д.Г., Честных О.В. Пулы углерода фитомассы и почв сосновых лесов России // Хвойные бореальной зоны. 2004. Т. 22. № 1–2.
 28. Ценофонд лесов Европейской России [Электронный ресурс]. <http://cepl.rssi.ru/bio/flora/main.htm> (дата обращения 15.03.2022)
 29. Шаблий И.В. Формирование дубово-сосновых насаждений в условиях свежих судубрав Южной части Полесья и Северной лесостепи. Автореф. дис. ... канд. биол. н. Киев, 1990. 25 с.
 30. Шильцова Г.В., Ласточкина В.Г. Влияние полога соснового и березового леса на химический состав осадков в заповеднике “Кивач” // Тр. Карельского научного центра РАН. 2006. № 10. С. 180–184.
 31. Clarke N., Zindra D., Ulrich E., Mosello R., Derome J., Derome K., König N., Lövblad G., Draaijers G.P.J., Hansen K., Thimonier A., Waldner P. Sampling and Analysis of Deposition. 66 p. Part XIV // Manual on methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forests. UNECE, ICP Forests, Hamburg. 2010. ISBN: 978-3-926301-03-1. <http://www.icp-forests.org/Manual.htm>
 32. Córdova S.C., Olk D.C., Dietzel R.N., Mueller K.E., Archontoulis S.V., Castellano M.J. Plant litter quality affects the accumulation rate, composition, and stability of mineral-associated soil organic matter // Soil Biology and Biochemistry. 2018. V. 125. P. 115–124.
 33. 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. V. 262. № 9. P. 1742–1747. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.07.033>
 34. Gielen B., Neirynek 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. V. 151. № 3. P. 270–278. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2010.10.012>
 35. Grüneberg E., Ziche D., Wellbrock N. Organic carbon stocks and sequestration rates of forest soils in Germany // Global change biology. 2014. V. 20. № 8. P. 2644–2662.
 36. Kalbitz K., Kaiser K. Contribution of dissolved organic matter to carbon storage in forest mineral soils // J. Plant Nutr. Soil Sci. 2008. V. 171. P. 52–60. <https://doi.org/10.1002/jpln.200700043>

37. 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. V. 12. Article 1179.
38. Lehmann J., Kleber M. The contentious nature of soil organic matter // *Nature*. 2015. V. 528. № 7580. P. 60–68.
39. Lettens S., van Orshoven J., van Wesemael B., Muys B., Perrin D. Soil organic carbon changes in landscape units of Belgium between 1960 and 2000 with reference to 1990 // *Global Change Biology*. 2005. V. 11. № 12. P. 2128–2140.
40. Mukhortova L., Schepaschenko D., Moltchanova E., Shvidenko A., Khabarov N., See L. Respiration of Russian soils: Climatic drivers and response to climate change // *Science of the Total Environment*. 2021. V. 785. P. 147314.
41. 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. V. 27. № 5. P. 1083–1096.
42. Verstraeten A., De Vos B., Neiryneck J., Roskams P., Hens M. Impact of air-borne or canopy-derived dissolved organic carbon (DOC) on forest soil solution DOC in Flanders, Belgium // *Atmospheric environment*. 2014. V. 83. P. 155–165.
43. *World Reference Base for Soil Resources* 2014. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports. 2015. IUSS Working Group. Rome: FAO, 203 p.

Estimates of Dissolved Carbon Leaching from Soil in the Dominant Forest Types of the Bryansk Region

A. I. Kuznetsova^{1, *}, A. V. Gornov¹, M. V. Gornova¹, D. N. Tebenkova¹,
A. D. Nikitina¹, and V. A. Kuznetsov²

¹ Center for Forest Ecology and Productivity RAS, Moscow, 117997 Russia

² Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991 Russia

*e-mail: nasta472288813@yandex.ru

The problem of assessing carbon fluxes and pools in forests is relevant in connection with climate change and the contribution of forests to carbon stocks. This article provides a comparative assessment of the input of carbon with throughfall and the dissolved organic carbon leaching from soils of different types of coniferous–broadleaf forests on sandy soil-forming rocks. The objects of study are the dominant types of coniferous–broadleaf forests of the Bryansk region: Pine forests, Pine–Broadleaf forests, and Broadleaf–Spruce forests. On average, over three years (2016–2019) of observations, the carbon input with rain and snow precipitation in Pine forests and Pine–Broadleaf forests was 60 ± 4 kg C/ha per year and turned out to be higher than in Broadleaf–Spruce forests, where the input level is 47 ± 2 kg C/ha per year. The removal of organic carbon from organic horizons in Broadleaf–Spruce forests is on average 4 times lower (14 ± 4 kg C/ha per year) than in Pine forests, characterized by thick litter (56 ± 22 kg C/ha per year), and 2.5 times lower than in Pine–Broadleaf forests (36 ± 12 kg C/ha per year). Leaching of carbon from the lower mineral horizons for different types of coniferous–broadleaf forests varied on average from 6 to 12 kg C/ha per year. The intra-profile distribution of DOC indicates a more efficient carbon fixation in the mineral part of the profile in pine forests than in Broadleaf–Spruce forests.

Keywords: Bryansk Forest Reserve, coniferous–broadleaf forests, throughfall, soil water, dissolved organic carbon, Albic Umbric Podzol