

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ЦЕНТР ПО ПРОБЛЕМАМ ЭКОЛОГИИ И ПРОДУКТИВНОСТИ ЛЕСОВ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

На правах рукописи



Кузнецова Анастасия Игоревна

**ВЛИЯНИЕ РАСТИТЕЛЬНОСТИ НА ЗАПАСЫ УГЛЕРОДА В ПОЧВАХ
ДОМИНИРУЮЩИХ ХВОЙНО-ШИРОКОЛИСТВЕННЫХ ЛЕСОВ
ЕВРОПЕЙСКОЙ ЧАСТИ РОССИИ**

Специальность:

06.03.02 – Лесоведение, лесоводство, лесоустройство и лесная таксация
(биологические науки)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата биологических наук

Москва
2022

Работа выполнена в лаборатории структурно-функциональной организации и устойчивости лесных экосистем ФГБУН Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов Российской академии наук.

Научный руководитель:

Лукина Наталья Васильевна,

доктор биологических наук, член-корреспондент РАН

Официальные оппоненты:

Курганова Ирина Николаевна, доктор биологических наук, доцент, главный научный сотрудник, Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения ФИЦ «Пущинский научный центр Российской академии наук»

Дымов Алексей Александрович, доктор биологических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Институт биологии ФИЦ «Коми научный центр Уральского отделения Российской академии наук»

Ведущая организация:

Институт леса ФИЦ «Карельский научный центр Российской академии наук»

Защита диссертации состоится 15 сентября 2022 г. в 10.00 часов на заседании диссертационного совета Д 002.054.01 по защите докторских и кандидатских диссертаций на базе Института лесоведения Российской академии наук по адресу: 143030, Московская обл., Одинцовский р-он, с. Успенское, ул. Советская, д. 21. тел./факс: 8(495)6345257. E-mail: root@ilan.ras.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института лесоведения РАН и на сайте: <http://ilan.ras.ru> (дата размещения 13 июля 2022 г.).

Автореферат разослан «___» _____ 2022 г.

Ученый секретарь
совета Д 002.054.01, к.б.н.



И.А. Уткина

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Изменения климата являются одним из современных глобальных вызовов. Леса играют огромную роль в регулировании климата благодаря их способности поглощать парниковые газы и хранить углерод как в биомассе, так и в почвах. Доля почвенного углерода в общих запасах углерода лесов достигает 40% и больше (Framstad et al., 2013). Основными факторами варьирования запасов почвенного углерода в лесах являются климат, почвообразующие породы, рельеф, антропогенное воздействие и биота: растительность, животные и микроорганизмы.

Растительность, которая является основным источником поступления органического вещества в почву, взаимодействуя с почвенной биотой, перерабатывающей растительный опад, абиотическими (климатические условия, почвообразующие породы, рельеф) и антропогенными (режимы хозяйственной деятельности в прошлом и настоящем, лесные пожары) факторами, определяет процессы формирования и накопления соединений углерода в почвах. Изменение состава растительности является драйвером динамики запасов почвенного углерода, однако анализу этого вопроса уделено недостаточно внимания. От состава растительности зависят количество и качество поступающего растительного опада, особенности его трансформации и перехода в почвенные пулы при активном участии редуцентов, а также процессы миграции соединений углерода в пределах почвенного профиля и выноса соединений углерода из почв (Gielen et al, 2011; Krishna and Mohan, 2017).

При оценках запасов углерода в лесных почвах России на национальном и региональном уровнях выявлено влияние различных факторов (Честных и др., 2004, 2007; Щепаченко и др., 2013; Чернова и др., 2021 и др.) на почвенные пулы, включая климат, рельеф, формации лесов. Оценки, основанные на локальных исследованиях запасов углерода в автоморфных и гидроморфных лесных почвах, даны для таежных лесов (Мажитова и др., 2003; Машика, 2005; Бобкова и др, 2014; Vakhmet, 2018; Дымов, 2018; Честных и др., 2020; Чернова и др., 2020; Рыжова и др., 2020). На основании этих исследований показано влияние рельефа, типа почв, истории природопользования на пулы углерода в почвах. Для таежных лесов также показано влияние древесной растительности и напочвенного покрова на запасы углерода в почвах (Lukina et al, 2020). Оценки запасов почвенного углерода в подзоне хвойно-широколиственных лесов европейской части России немногочисленны (Баева и др., 2017; Телеснина и др., 2017; Демаков и др., 2018). В этих работах показано влияние истории природопользования и рельефа на пулы углерода. Открытым остается вопрос о

влиянии растительности на запасы почвенного углерода в хвойно-широколиственных лесах разных типов.

Цель работы – оценить влияние растительности на запасы углерода в почвах хвойно-широколиственных лесов, доминирующих в европейской части России.

Задачи, поставленные для достижения цели:

1. Выявить информативные индикаторы влияния растительности на запасы почвенного углерода в доминирующих равнинных и горных лесах европейской части России;

2. Оценить вклад растительности в варьирование запасов почвенного углерода в равнинных и горных хвойно-широколиственных лесах с учетом влияния абиотических (климат и почвообразующие породы) факторов;

3. Оценить поступление соединений углерода с атмосферными выпадениями и их вынос с почвенными водами в доминирующих типах равнинных хвойно-широколиственных лесов европейской части России.

Научная новизна и теоретическая значимость. Впервые дана оценка влияния растительности на запасы почвенного углерода в хвойно-широколиственных лесах доминирующих типов европейской части России.

Показано, что запасы углерода в минеральных горизонтах почв достигают максимальных значений в лесах с наибольшим богатством видов растений, образующих опад разного качества, то есть в лесах с высоким функциональным разнообразием растений. Видовая насыщенность древесных растений в ярусе трав вносит существенный вклад в варьирование запасов углерода в минеральных горизонтах почв.

Установлено, что информативными предикторами варьирования запасов углерода в нижних подгорizontах подстилки и минеральных горизонтах почв хвойно-широколиственных лесов являются такие показатели подгорizontа опада подстилки, как степень насыщенности основаниями и отношение C/N.

Дана сравнительная оценка поступления соединений углерода с атмосферными выпадениями и их выноса с почвенными водами в разных типах хвойно-широколиственных лесов на песчаных и суглинистых почвообразующих породах. Показано, что в хвойно-широколиственных лесах с доминированием видов хвойных древесных растений (сосны и ели), характеризующихся мощной подстилкой и высоким уровнем поступления органических соединений с кронными водами, концентрации растворимого органического углерода в почвенных водах выше, чем в лесах с доминированием видов широколиственных деревьев.

Практическая значимость. Результаты работы могут быть использованы для разработки систем поддержки принятия решений в лесохозяйственной практике для устойчивого управления лесами в условиях глобальных изменений климата. Полученные результаты послужат основой для разработки системы индикаторов оценки текущего и потенциального уровня аккумуляции почвенного органического вещества при разных климатических условиях и режимах лесопользования.

Результаты оценки влияния факторов на накопление углерода в почвах лесов необходимы для разработки мер по смягчению изменений климата и прогноза динамики экосистемных функций и услуг в условиях комбинированного влияния природных и антропогенных факторов.

Защищаемые положения:

1. Обоснованная и достоверная оценка влияния растительности на запасы почвенного углерода может быть дана с учетом функционального разнообразия растений.

2. Видовая насыщенность древесных растений в ярусе трав является индикатором накопления углерода в почвах хвойно-широколиственных лесов.

3. Информативными предикторами варьирования запасов углерода в почвах являются такие показатели подгоризонта опада подстилки, как степень насыщенности основаниями и отношение C/N.

4. Концентрации растворенного органического углерода в почвенных водах хвойно-широколиственных лесов обусловлены мощностью подстилки и поступлением органических соединений с кронными водами.

Личный вклад автора. Полевые почвенные исследования, отбор почвенных образцов, анализ и обобщение полученных результатов осуществлены соискателем лично или при непосредственном участии.

Соответствие содержания диссертации паспорту специальности, по которой она рекомендуется к защите. Исследования соответствуют паспорту специальностей научных работников, шифру специальности 06.03.02 – Лесоведение, лесоводство, лесоустройство и лесная таксация. Области исследований: роль экологических факторов в жизни леса и их изменений под влиянием лесохозяйственных мероприятий и применяемых механизмов. Водоохранное, водорегулирующее, защитное, санитарно-гигиеническое, почвозащитное, почвообразующее и рекреационное значение леса, разработка мероприятий по усилению средообразующей роли лесов.

Связь с научными программами и плановыми научными исследованиями. Работа выполнена в рамках темы ГЗ ЦЭПЛ РАН

«Методические подходы к оценке структурной организации и функционирования лесных экосистем» (проект № АААА-А18-118052590019-7) при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 20-34-90137) и Российского научного фонда (проект № 16-17-10284).

Апробация работы. Основные результаты работы были представлены и обсуждены на семинарах ЦЭПЛ РАН (2018-2022), на Международном молодежном научном форуме ЛОМОНОСОВ-2017 (Москва, 2017), VII Всероссийской научной конференции с международным участием «Теоретические и прикладные аспекты лесного почвоведения» (Петрозаводск, 2017), III и IV Всероссийской (с международным участием) научной конференции «Научные основы устойчивого управления лесами» (Москва, 2018, 2020), Международной научной конференции XXI Докучаевские молодежные чтения "Почвоведение - мост между науками" (Санкт-Петербург, 2018), V Международной научной конференции «Мониторинг и оценка состояния растительного мира» (Минск, 2018), четвертой открытой конференции молодых ученых Почвенного института имени В.В. Докучаева «Почвоведение: горизонты будущего – 2020» (Москва, 2020), VII Международной научной конференции, посвященной 90-летию кафедры почвоведения и экологии почв ТГУ «Отражение Био-, Гео-, Антропосферных взаимодействий в почвах и почвенном покрове» (Томск, 2020), работе подкомиссии по Лесному почвоведению VIII Съезда общества почвоведов им. В.В.Докучаева (Сыктывкар, 2021), Всероссийской научной конференции «Почвенно-экологические исследования окружающей среды лизиметрическими методами» (Москва, 2021).

Публикация результатов. По теме диссертации опубликовано 15 печатных работ, в том числе 6 публикаций в изданиях, включенных в Перечень ВАК и индексируемых в международных базах данных, 6 тезисов докладов на международных и всероссийских научных конференциях.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка цитируемой литературы из 213 источников (в том числе 144 иностранных работ). Диссертация изложена на 130 страницах, содержит 8 таблиц и 22 рисунка, 2 приложения.

Благодарности. Автор выражает благодарность научному руководителю Лукиной Н.В. – за руководство исследованиями, за советы и консультации, всестороннюю помощь и поддержку на всех этапах работы; а также всем сотрудникам Лаборатории структурно-функциональной организации лесных экосистем Центра по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН за внимание и помощь научного, технического, или организационного характера.

Особую благодарность автор выражает Горнову А.В., Горновой М.В., Тихоновой Е.В., Шевченко Н.Е. за работу с геоботаническим и лесотаксационным материалом, Гераськиной А.П. за оценки состава, разнообразия и биомассы почвенной макрофауны, Смирнову В.Э. за проведение статистической обработки материалов, сотрудникам ГПБЗ «Брянский лес» Солониной О.Н. и Гапонову С.А. за помощь в полевых лизиметрических экспериментах.

ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ

В главе на основе анализа многочисленных исследований показано, что на накопление углерода в почвах влияют как абиотические (климатические условия, почвообразующая порода, рельеф), так и различные антропогенные (хозяйственная деятельность, пожары) и биотические (растительность, животные и микроорганизмы) факторы. Важнейшим биотическим фактором накопления углерода в лесных почвах является растительность. Динамика пулов почвенного углерода, обусловленная растительностью, связана с количеством и качеством опада как отдельных видов (идентичность вида), так и с их совместным влиянием (разнообразием сообществ). Разнообразие растительности влияет на циклы углерода и азота через формирование опада разного качества, с одной стороны, и через изменение физических условий среды (влажность, температура), с другой стороны (Berg, 2020). Значимо влияние всех аспектов разнообразия. Ряд работ демонстрирует влияние на запасы углерода в почвах видов деревьев в лесных плантациях (Vesterdal et al., 2008 и др.), структуры крон в сосновых лесах северо-западной Германии (Penne et al., 2010), внутриценотической мозаичности, то есть структурного разнообразия, биогеоценозов в южной тайге (Подвезенная, Рыжова, 2010).

Проведены оценки запасов почвенного углерода в лесах России на национальном (Честных и др., 2004, 2007; Щепаченко и др., 2013; Чернова и др., 2021) и региональном (Мажитова и др., 2003; Машика, 2005; Бобкова и др., 2014; Vakhtmet, 2018; Дымов, 2018; Честных и др., 2020; Чернова и др., 2020; Рыжова и др., 2020) уровнях. Оценки даны в основном на примере разных типов таежных лесов в автоморфных и гидроморфных условиях. Региональные оценки запасов почвенного углерода в подзоне хвойно-широколиственных лесов европейской части России немногочисленны (Баева и др., 2017; Телеснина и др., 2017; Демаков и др., 2018). Результаты этих работ в таежных и хвойно-широколиственных лесах свидетельствуют о влиянии климатических условий, почвообразующих пород, рельефа, формаций лесов на почвенные пулы углерода. Показано влияние древесных растений и напочвенного покрова на запасы

углерода в почвах таежных лесов (Lukina et al, 2020).

Ввиду тесной связи между разнообразием растительности и запасами углерода в почвах, возможно управление пулами почвенного углерода при введении климатически оптимизированного лесного хозяйства. Однако для того, чтобы управлять пулами почвенного углерода, необходимы более глубокие знания о секвестрирующем потенциале почв и основных контролирующих его факторах, по которым отмечены пробелы в знаниях. Например, единичны оценки вклада нижних ярусов растительности в варьирование запасов почвенного углерода, редки оценки влияния мозаичности (структурного разнообразия) лесов на пул почвенного углерода в лесах разных типов, сравнительные оценки влияния отдельных древесных растений и их комбинированного влияния на почвенный пул углерода. Также редки оценки влияния регулирования растительностью объемов и состава атмосферных осадков, проникающих сквозь растительный полог, на запасы почвенного углерода. Практически отсутствуют оценки вклада различных, действующих одновременно факторов, в том числе связанных с растительностью, в регулирование запасов почвенного углерода. Большая часть работ сосредоточена на оценках содержания углерода в почвах, а не его запаса. Сделано заключение об отсутствии исследований, нацеленных на оценку вклада биотических факторов, включая растительность, в накопление почвенного углерода в хвойно-широколиственных лесах России.

ГЛАВА 2. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объекты исследования. Объектами исследования являются доминирующие типы равнинных и горных хвойно-широколиственных лесов европейской части России (рис.1), формирующихся в автономных позициях ландшафта. Равнинные хвойно-широколиственные леса исследовали в Брянском Полесье и на Москворецко-Окской равнине, горные – на Северо-Западном Кавказе. Объектами исследования на территории Брянского Полесья (БП) послужили сосняки кустарничково-зеленомошные (БП1), сосняки сложные волосистоосоково-разнотравные (БП2), полидоминантные широколиственные леса с елью зеленчуково-волосистоосоковые (БП3); на территории Москворецко-Окской равнины (МО) были выбраны березово-липовые леса волосистоосоковые (МО1) и широколиственно-еловые кислично-разнотравные леса (МО2); на территории Северо-Западного Кавказа (СЗК) – осиново-грабовые жимолостно-мелкотравные леса (СЗК1), буково-пихтово-грабовые мелкотравные леса (СЗК2) и пихтово-буковые метвопокровные леса (СЗК3). В каждом типе леса заложено по 3 участка размером 0.25 га, всего 27 пробных участков. Характеристика

объектов исследования приведена в табл. 1.

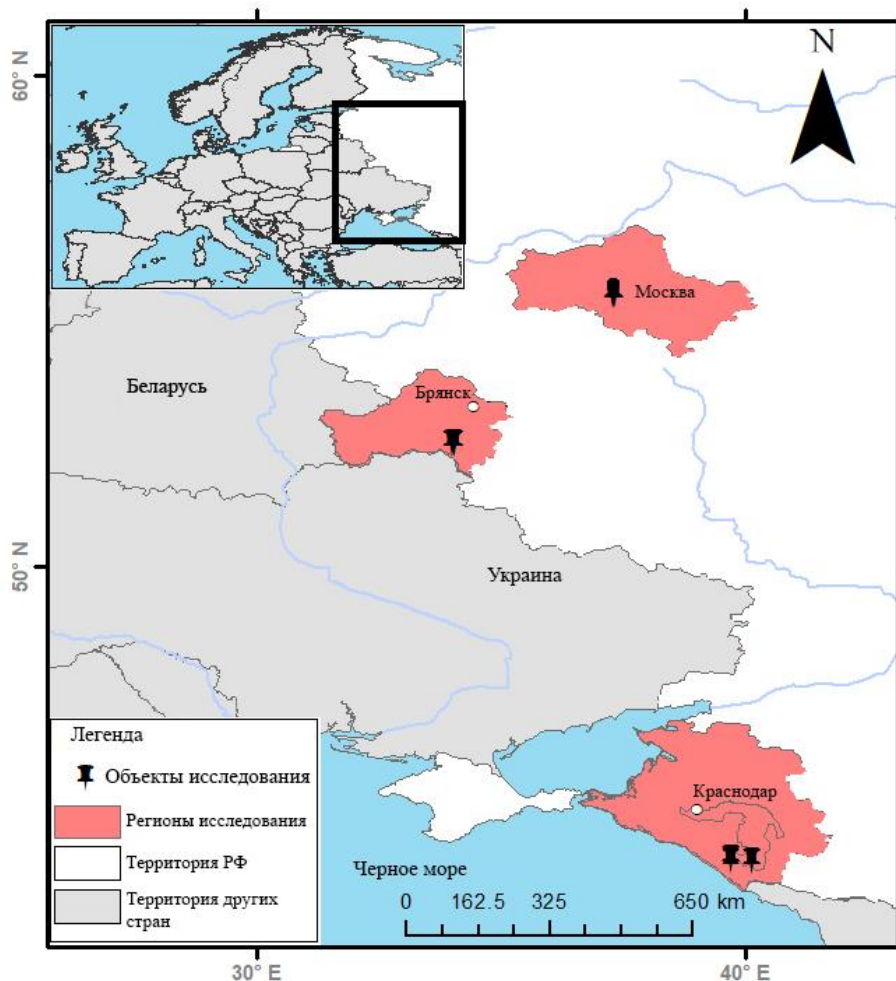


Рисунок 1. Схема расположения пробных площадей объектов исследования

Методы исследования. На каждой из 27 пробных площадей в 2016 году в узлах регулярной сети с шагом 10 м с помощью почвенного бура отбирались индивидуальные образцы из подстилки и минеральных горизонтов почв до глубины 50 см. Из этих образцов путем смешивания получали комбинированные образцы в соответствии с горизонтами почв в трехкратной повторности. Кроме того, на каждой пробной площади заложен почвенный разрез до глубины 100 см. В 2019 году в лесах разных типов в трехкратной повторности с помощью почвенного бура дополнительно отобраны образцы почвы до глубины 50 см. За период исследований отобрано 795 образцов, среди них 325 образцов подстилки, включающим разделение на подгоризонты L, F, H и 470 образцов из минеральных горизонтов почв.

В лаборатории почвенные образцы высушивались и просеивались через сито 2 мм. Измерение содержания углерода и азота проводилась на CHN анализаторе (EA 1110 (CHNS-O)). Для определения качества опада исследовали свойства в подгоризонте опада L подстилки. Актуальную кислотность (pH)

определяли потенциометрически в водной вытяжке. Обменную кислотность определяли в вытяжках 1N KCl (pH=7.0) соответственно титрованием до pH 7.8 (Теория., 2006). Для определения содержания доступных для биоты соединений Ca, K, Mg, Na, Fe, образцы почв обрабатывали 1M CH₃COONH₄ (pH = 4,65) (Halonen, 1983, Methods..., 1989). Содержание металлов определяли методом атомно-абсорбционной спектроскопии (AAAnalyst 800 spectrometer). Степень насыщенности основаниями рассчитывалась как отношение суммы оснований Ca, K, Mg, Na к сумме содержания этих оснований и обменной кислотности. Для почвообразующих пород определялся валовой химический состав методом рентгенофлуоресцентного анализа и содержание гранулометрических фракций по ГОСТ 12536-2014.

Для определения запасов подстилки отбирались образцы с использованием рамки 0.25×0.25 м, для определения плотности в опорных разрезах каждые 10 см отбирались образцы с использованием бьюкса объемом 100 см³. Все образцы высушивались при 105 °С и взвешивались. Запасы углерода в органическом горизонте рассчитывали путем умножения веса пробы на содержание углерода. Запасы углерода в минеральных слоях почвы рассчитывались путем умножения объемной плотности, содержания углерода и мощности минерального слоя (Распоряжение..., 2017).

Для характеристики объемов поступления углерода с атмосферными выпадениями, внутрипрофильной миграции и выноса с почвенными водами на объектах Брянского Полесья и Москворецко-Окской равнины устанавливали снегоприемники, осадкоприемники и почвенные лизиметры не менее чем в 3 кратной повторности для каждого типа леса в доминирующих элементах мозаики под двумя почвенными горизонтами: LFH (глубина установки ~5 см) и E/BF(BT) (глубина установки ~40 см). Учеты в вегетационный сезон производили ежемесячно. В период с ноября по март в период снегонакопления вода накапливалась в коллекторы, и отборы проводили однократно по истечении этого периода.

При отборе и хранении образцов использовали критерии, предложенные в Руководстве UNECE-CLRTAP ICP по лесам, Часть XIV (Clarke et al., 2010). На объекте Брянского Полесья анализировали данные за трехлетний период с ноября 2016 по ноябрь 2019. На объекте Москворецко-Окской равнины анализировали данные за двухлетний период с мая 2019 по май 2021. Все пробы после размораживания фильтровали через мембранный фильтр M-Millipore с диаметром пор 0.45 мкм, что позволяло учесть растворенный органический углерод. Содержание углерода определяли методом термокаталитического

окисления с бездисперсионной ИК-регистрацией на анализаторе общего углерода/азота TOC-VCPN.

Потоки углерода оценивали на основе расчета произведения средневзвешенных концентраций и соответствующих объемов поступлений воды. Для оценки поглощения/выноса углерода в подстилке в качестве приходной составляющей использовали массу элемента в атмосферных выпадениях, расходной – массу элемента в подстилочных лизиметрических водах (LFH). Для оценки поглощения/выноса углерода из минеральных горизонтов рассчитывали разницу масс элементов в лизиметрических водах, прошедших подстилку и прошедших нижний минеральный горизонт (E/BF(BT) соответственно. Оценка поглощения углерода балансовым способом (Гашкина и др., 2020) может быть завышена, поскольку не учитывает соотношение между процессами накопления углерода в горизонтах и его использования биотой с последующей минерализацией.

Геоботанические описания лесных сообществ выполнены на площадках 20 × 20 м в пределах каждой постоянной пробной площади. В каждом регионе выполнено от 8 до 14 геоботанических описаний для каждого типа леса. Всего выполнено 101 описание (Аккумуляция..., 2018).

Для оценки функционального разнообразия растений все виды растений разделены на функциональные группы, различающиеся по качеству опада и, соответственно, по скорости его разложения. Выделяли две функциональные группы: растения с быстро- и медленноразлагаемым опадом. К растениям с быстроразлагаемым опадом относятся лиственные деревья с высоким качеством опада (липа, граб, клен и др.), а также неморальные травы; к растениям с медленноразлагаемым опадом относятся хвойные деревья (ель, сосна), некоторые широколиственные (бук, дуб), а также кустарнички. Среди объектов исследования выделены как монодоминантные (лиственные и хвойные), так и смешанные полидоминантные леса. В качестве индикаторов разнообразия растений использовали параметры видového разнообразия: видовое богатство древесных растений в ярусах А и В, видовая насыщенность растений в напочвенном покрове (яр.С), видовая насыщенность трав в напочвенном покрове (яр.С), видовая насыщенность древесных растений в напочвенном покрове (яр.С). Для оценки объемов стволовой древесины на каждой пробной площади измеряли диаметр и высоту каждого дерева выше 1.5 м. Объем ствола рассчитывали с помощью таблиц объемов (Приказ..., 1989, 1995). Затем рассчитывали запас углерода в биомассе ствола по уравнению в соответствии с официально принятыми национальными рекомендациями (Распоряжение..., 2017).

Таблица 1. Характеристика объектов исследования хвойно-широколиственных лесов

Регион*	Тип леса**	Координаты	Средне-годовая температура, °С	Годовое количество осадков, мм	<0,002 мм (%) в составе ПП	Формула древостоя	Возраст
МО	МО1	55°34'-55°35' N, 37°16'-37°20' E	4.6	675	22.5±1.4	8Лп2Б+Ос+ Д+Кл+Е	70-90
	МО2				18.9±0.6	7Е2Д1Б+Ос +Лп+С	>100
БП	БП1	52°32'-52°35' N, 34°00'-34°05' E	5.8	584	1.2±0.3	9С1Б+Д	40-60
	БП2				2.2±0.5	5С2Е2Б1Д+ Кл+Лп+Ос	70-120
	БП3				1.3±0.1	3Д3Кл3Лп1Е +Вз+Ос+Яс	более 120
СЗК	СЗК1	43°59'-44°03' N, 39°42'-40°08' E	10.2- 11.1	1080- 1145	25.5±3.4	6Гр3Ос1Д+Б +Пх+Лп+Вш	50-60
	СЗК2				25.3±4.5	5Гр2Пх2Бк1 Ос+Д+Яс+Б +К+Лп+Вш	80-110
	СЗК3				17.9±1.6	8Бк+2Пх+Гр	>450

*МО-Москворецко-Окская равнина, БП-Брянское Полесье, СЗК-Северо-Западный Кавказ; ** БП1 – Сосняк кустарничково-зеленомошный, БП2 – Сосняк сложный волосистоосоково-разнотравный, БП3 – Полидоминантный широколиственный лес с елью зеленчуково-волосистоосоковый, МО1 – Березово-липовый лес волосистоосоковый, МО2 – Широколиственно-еловый кислично-разнотравный лес, СЗК1 – Осиново-грабовый жимолостно-мелкотравный лес, СЗК2 – Буково-пихтово-грабовый мелкотравный лес, СЗК3 – Пихтово-буковый метвопокровный лес; ПП – почвообразующая порода.

Статистическая обработка проводилась с использованием программы R (R Core Team, 2020). Однофакторный дисперсионный анализ (ANOVA) проведен для оценки вклада региона и типа леса в вариацию, с одной стороны, других факторов, влияющих на запас углерода в почве (почвообразующие породы, растительность, качество подстилки), а с другой стороны, в вариацию непосредственно запасов углерода. V-тест (Husson et al., 2017) также использован для оценки влияния региона и типа леса на величину как других факторов, влияющих на запас углерода в почве, так и запасов углерода в почвах. Тест и связанная с ним описательная статистика рассчитаны с использованием категорий функций пакета R «FactoMineR» (Le et al., 2008). Для оценки вклада растительности и качества опада при одновременном влиянии других факторов в вариацию запасов углерода в подстилке и минеральной толще почв проведен анализ с использованием иерархического разложения (Chevan, Sutherland, 1991). Анализ выполнен с помощью пакета hier.part (Mac Nally and Walch, 2004).

ГЛАВА 3. ЗАПАСЫ УГЛЕРОДА В ПОЧВАХ ХВОЙНО-ШИРОКОЛИСТВЕННЫХ ЛЕСОВ И ФАКТОРЫ ЕГО НАКОПЛЕНИЯ

Основными драйверами динамики почвенного углерода в лесах являются климатические условия, почвообразующая порода, рельеф, биота (растительность, животные и микроорганизмы), антропогенное воздействие (Семенов и др., 2015; Berg, 2020 и др.). Актуальной задачей является оценка влияния растительности, наряду с другими факторами, на запасы почвенного углерода в хвойно-широколиственных лесах.

В главе проанализированы изменения пулов почвенного углерода в хвойно-широколиственных лесах, доминирующих типов, формирующихся в автоморфных позициях ландшафтов в европейской части России. Исследовано влияние растительности на запасы почвенного углерода в равнинных и горных хвойно-широколиственных лесах, представляющих разные стадии послерубочных и пирогенных сукцессий и формирующихся в разных климатических условиях на почвообразующих породах разного гранулометрического и химического состава.

Результаты однофакторного дисперсионного анализа продемонстрировали значительный вклад таких факторов, как регион и тип леса, в изменение запасов углерода в органических и минеральных слоях почвы (табл. 2). Фактор «регион» обеспечил 37% вариации запасов углерода в слое FH и более 40% вариации запасов углерода минеральных горизонтов. Региональный фактор отражает, прежде всего, различия в климатических условиях, а также различия в составе почвообразующих пород. Леса Северо-Западного Кавказа, формирующиеся в наиболее благоприятных климатических условиях на суглинистых почвообразующих породах, отличались самым высоким запасом углерода в минеральных слоях 0–30 см и 30–50 см (83 и 26 т/га соответственно) (рис.2) и в почвах в целом.

Самым низким запасом углерода в почвах характеризовались леса Брянского Полесья, формирующиеся хотя и в благоприятных климатических условиях, но на песчаных почвообразующих породах. Леса Москворецко-Окской равнины, формирующиеся на суглинках, аккумулируют в почвах больше углерода, чем леса Брянского Полесья, но меньше, чем леса Северо-Западного Кавказа.

В слое подстилки FH самый низкий запас углерода обнаружен в лесах Москворецко-Окской равнины, в то время как леса Брянского Полесья характеризовались самым высоким запасом С в подстилке: 0.9 и 5.2 т/га, соответственно (рис.2). Доля FH-слоя в общем запасе углерода снижалась от 19%

в лесах Брянского Полесья до 3% в лесах Северо-Западного Кавказа и 2% в лесах Москворецко-Окской равнины.

Таблица 2. Однофакторный дисперсионный анализ ANOVA влияния регионов и типов леса на запасы почвенного углерода (Kuznetsova et al., 2021).

Фактор	Слой, см						n
	FH, <i>Cst</i>		0–30 см, <i>Cst</i>		30–50 см, <i>Cst</i>		
	R^2	<i>p</i>	R^2	<i>p</i>	R^2	<i>p</i>	
Регионы	0.37	<0.001	0.43	<0.001	0.40	<0.001	157
Типы леса СЗК	0.07	0.025	0.44	<0.001	0.29	0.004	57
Типы леса МО	0.26	0.011	0.24	<0.001	0.05	0.127	47
Типы леса БП	0.48	<0.001	0.24	<0.001	0.07	0.298	53

Аббревиатуры: СЗК – Северо-Западный Кавказ; МО – Москворецко-Окская равнина; БП – Брянское Полесье; *Cst* – запас углерода; R^2 – коэффициент детерминации, *p* – *p*-value ANOVA F-тест, n – объем выборки.

Существенный вклад в варьирование запасов почвенного углерода вносит тип леса. Среди лесов Северо-Западного Кавказа самый высокий запас углерода в органических горизонтах обнаружен в лесах СЗК2 (2.5 т/га), а самый низкий – в лесах СЗК1 (1.7 т/га) (рис.2). Леса СЗК3 накапливали наименьшее количество углерода в слоях 0–30 и 30–50 см (58 и 16 т/га, соответственно), в то время как леса СЗК2 характеризовались наибольшим запасом углерода в этих слоях (98 и 35 т/га, соответственно), а леса СЗК1 занимали промежуточное положение (91 и 28 т/га в слоях 0–30 и 30–50 см, соответственно) (рис.2). Типы лесов обеспечивали несущественный вклад в вариацию запасов углерода в FH-слое (только 7%) и значительный (более 40 и 29 %) вклад в вариацию запасов углерода в слоях 0–30 и 30–50 см, соответственно (табл. 2).

В лесах Москворецко-Окской равнины также очевидны различия в запасах углерода в почве между типами леса, в которых преобладают разные виды древесных растений (рис.2). По сравнению с лесами МО2, леса МО1 характеризовались меньшими запасами углерода в слое FH (0.1 т/га) и минеральных слоях 0–30 и 30–50 см (60 и 14 т/га, соответственно). Типы лесов обеспечивали 26% вариации запасов углерода FH-слоя, около 30% вариации запасов углерода в минеральном слое 0–30 см, и лишь 5% в слое 30–50 см (табл. 2).

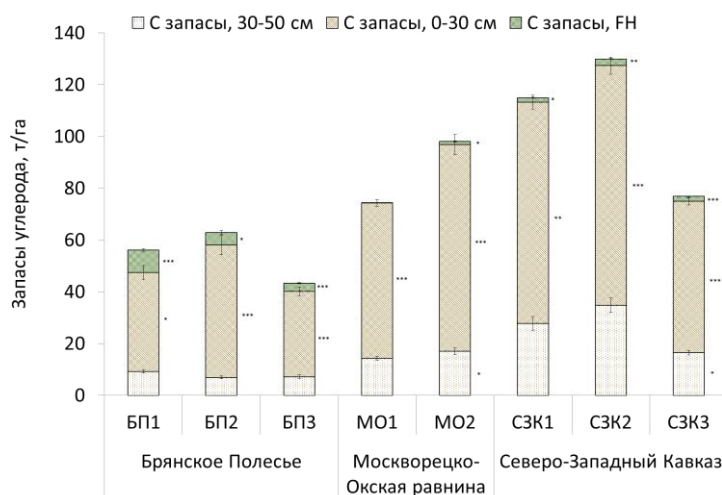


Рисунок 2. Запасы углерода в лесах разных типов хвойно-широколиственной зоны. БП1 – Сосняк кустарничково-зеленомошный ($n=22$), БП2 – Сосняк сложный волосистоосоково-разнотравный ($n=22$), БП3 – Полидоминантный широколиственный лес с елью зеленчуково-волосистоосоковый ($n=39$), МО1 – Березово-липовый лес волосистоосоковый ($n=39$), МО2 – Широколиственно-еловый кислотно-разнотравный лес ($n=30$), СЗК1 – Осиново-грабовый жимолостно-мелкотравный лес ($n=30$), СЗК2 – Буково-пихтово-грабовый мелкотравный лес ($n=36$), СЗК3 – Пихтово-буковый метвопокровный лес ($n=33$). Звездочки указывают на значимость различий между средним значением по категории и общим средним: * - $p \leq 0.1$, ** - $p \leq 0.01$, *** - $p \leq 0.001$.

При сравнении типов леса Брянского Полесья оказалось, что наибольшим запасом углерода в слое FN характеризовались леса БП1 (8.6 против 3.4 т/га в лесах БП1 и БП3, соответственно) (рис.2). Леса БП3 характеризовались низкими запасами углерода в минеральных слоях 0–30 (33 т/га) (рис.2). Леса БП2 характеризовались наибольшим запасом углерода в минеральных слоях 0–30 (51 т/га). Запасы углерода в слое 30–50 см были сопоставимы во всех трех типах леса и составляли от 7 до 9 т/га. Типы лесов в БП обеспечивали 48% вариации запасов углерода слоя FN и, как и в почвах лесов МО, 24% в слое 0–30 см и лишь 7% в слое 30–50 см (табл. 2).

Таким образом, наибольший вклад типов леса в вариацию запасов углерода в подстилке обнаружен в равнинных лесах, а наибольшим вкладом типов леса в вариацию запаса углерода в минеральных горизонтах отличались горные леса, в составе которых леса с контрастными различиями в качестве опада, продуцируемого древостоями старше 450 лет. При этом и в тех, и в других случаях самый высокий вклад типа леса обнаружен в верхнем минеральном слое 0–30 см.

Проведенное исследование подтвердило влияние климата и почвообразующих пород на запасы углерода в почве и продемонстрировало влияние растительности на запасы углерода в почве. Показано, что важными предикторами изменения запасов углерода в почве являются показатели качества

подгоризонта опада L подстилки, такие как степень насыщенности основаниями и отношение C/N (рис.3). Самые высокие запасы углерода в органических горизонтах демонстрируют леса с подгоризонтом опада низкого качества, характеризуемого низкой степенью насыщенности основаниями, высокой кислотностью и широким отношением C/N.

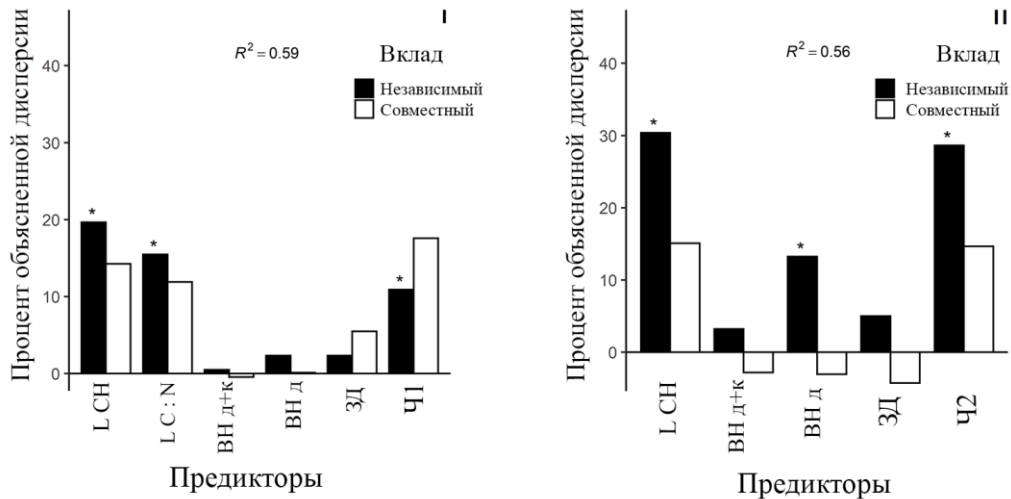


Рисунок 3. Вклад основных предикторов в дисперсию (I) запасов углерода почвы в органогенных горизонтах (FH-подгоризонт) и (II) запасов углерода в почве в 50-см минеральном слое. Независимые переменные: L CH – степень насыщенности основаниями в подгоризонте опада; L C : N - соотношение C/N в подстилке; ВН д+к – общая видовая насыщенность ярусов кустарников и деревьев; ВН д – видовая насыщенность древесных растений в ярусе С; ЗД – запас стволовой древесины; Ч1 - функциональные группы дождевых червей, связанные с органическим горизонтом; Ч2 - функциональные группы дождевых червей, связанные с минеральными горизонтами почвы; звездочками обозначена значимость: * — $p \leq 0.5$. На рисунке 2 вида вкладов и R2 для полной модели. Проценты по оси ординат рассчитаны от дисперсии, объясненной моделью, не от общей вариации в данных.

Наряду с качеством опада, информативным предиктором запаса углерода в слое FH и 50-сантиметровом минеральном слое оказалась видовая насыщенность древесных растений в ярусе трав (рис.3). Этот параметр можно рассматривать как интегральный показатель, учитывающий разнообразие древесных видов всех ярусов растительности, поскольку обновление всех видов происходит непосредственно в ярусе трав. Этот индикатор также демонстрирует весь потенциал разнообразия древесных растений в верхних ярусах, то есть отражает не только современный состав верхних ярусов, но и потенциал видового состава древесных растений и, следовательно, прошлую историю, когда не только современные, но и другие виды древесных растений могли доминировать в верхних ярусах и вносить вклад в запасы углерода в минеральных слоях почвы. Значительный вклад в вариацию запасов углерода в подстилке и минеральном профиле вносит биомасса дождевых червей, принадлежащих к функциональным группам, связанным с подстилкой и минеральными горизонтами почв, соответственно (Гераськина, 2020).

Наибольшие запасы углерода в минеральных горизонтах почв обнаружены в смешанных лесах: широколиственно-сосновых, широколиственно-еловых, буково-пихтово-грабовых, т.е. в лесах с наибольшим богатством видов растений, принадлежащими к разным функциональным группам и образующих опад разного качества. Подстилка видов хвойных древесных растений и бука, отличающаяся низким качеством и низкой скоростью разложения, способствует накоплению массы органического горизонта, в то время как быстрое разложение опада высокого качества, к которому относится опад неморальных трав и лиственных деревьев, таких как липа, береза и граб, способствует интенсивным потокам углерода в минеральные слои.

Смешанный опад, состоящий как из быстро, так и медленно разлагающихся компонентов, является благоприятным субстратом для функционирования почвенной биоты, особенно, дождевых червей, что способствует накоплению углерода в почве (Гераськина, 2020; Kuznetsova et al, 2021). Таким образом, повышение функционального разнообразия растений приводит к увеличению запасов углерода в почвах хвойно-широколиственных лесов.

ГЛАВА 4. МИГРАЦИЯ УГЛЕРОДА С ПРИРОДНЫМИ ВОДАМИ В ДОМИНИРУЮЩИХ ТИПАХ ХВОЙНО-ШИРОКОЛИСТВЕННЫХ ЛЕСОВ

Экспериментальные измерения выноса углерода с почвенными водами в многолетней динамике в лесах России разных типов выполняются точечно, результаты не систематизированы (Шильцова, Ласточкина, 2006; Пристова, Забоева, 2007; Арчегова, Кузнецова, 2011; Султанбаева и др., 2015; Ершов и др., 2019). При этом перемещение растворенного органического углерода (РОУ) из верхних горизонтов почв в более глубокие может приводить к стабилизации и, следовательно, к значительному увеличению депонирования углерода в почве (Kalbitz, Kaiser, 2008). Вынос РОУ с почвенными водами необходимо учитывать для характеристики как баланса углерода в наземных экосистемах (Gielen et al., 2011), так и вклада выноса РОУ из почв в водные объекты (Nakhavali et al., 2021). Поэтому оценка поступления соединений углерода с атмосферными выпадениями и их внутривертикальной миграции в разных типах хвойно-широколиственных лесов является актуальной задачей.

В лесах Брянского Полесья, формирующихся на песчаных почвообразующих породах, поступление углерода с промывающими полог дождевыми и снеговыми осадками в БП1 и БП2, где доминирует сосна, составляло около 60 ± 4 кг С/(га год) и оказалось выше, чем в полидоминантных широколиственных лесах БП3, где уровень поступления составлял 47 ± 2 кг С/(га

год). В лесах БП1 и БП2 концентрации углерода в кроновых водах выше, чем в лесах БП3. Годовой вынос углерода с подстилочными водами в БП1 составил 56 ± 22 кг С/(га год), в БП2 – 36 ± 12 кг С/(га год), что обусловлено как мощной подстилкой сосновых лесов, так и высоким уровнем поступления РОУ с атмосферными выпадениями. В БП3 отмечен самый низкий вынос углерода – 14 ± 4 кг С/(га год). Случаи выноса органического углерода из нижних минеральных горизонтов в лесах БП оказались единичными и сопоставимыми во всех типах леса. В среднем за трехлетний период наблюдений среднегодовой вынос углерода с почвенными водами из минерального профиля в лесах БП1 составил 12 ± 6 кг С/(га год), в лесах БП2 – 6 ± 5 кг С/(га год), в лесах БП3 – 10 ± 7 кг С/(га год).

Оценка поглощения/выноса углерода (рис.4) в подстилке на основании разницы поступления углерода с атмосферными выпадениями и его выноса показывает, что в лесах БП3 происходит самое высокое накопление углерода в подстилке. Оценка поглощения углерода в минеральных горизонтах на основании разницы выноса углерода из подстилки и нижних минеральных горизонтов показывает, что интенсивное накопление характерно для чистых и смешанных сосновых лесов (БП1 и БП2). В лесах БП3 отмечено менее интенсивное накопление углерода в минеральных горизонтах почв по сравнению с другими типами леса.

В лесах МО1 поступление углерода составляло 85 ± 27 кг С/(га год) и оказалось ниже, чем в лесах МО2, где уровень поступления составлял 148 ± 70 кг С/(га год) за счет более высоких концентраций в лесах МО2. Годовой вынос углерода с подстилочными водами, несмотря на значительную разницу в поступлении углерода, достоверно не различался: в лесах МО1 вынос составил не менее 52 ± 4 кг С/(га год) за счет высоких объемов подстилочной воды, в лесах МО2 – не менее 74 ± 24 кг С/(га год) как за счет высоких концентраций, обусловленных развитой подстилкой, так и за счет высокого уровня поступления РОУ с атмосферными выпадениями. Потоки углерода из нижних минеральных горизонтов также достоверно не различались и составляли 37 ± 12 кг С/(га год) в лесах МО1 и 54 ± 18 кг С/(га год) в лесах МО2.

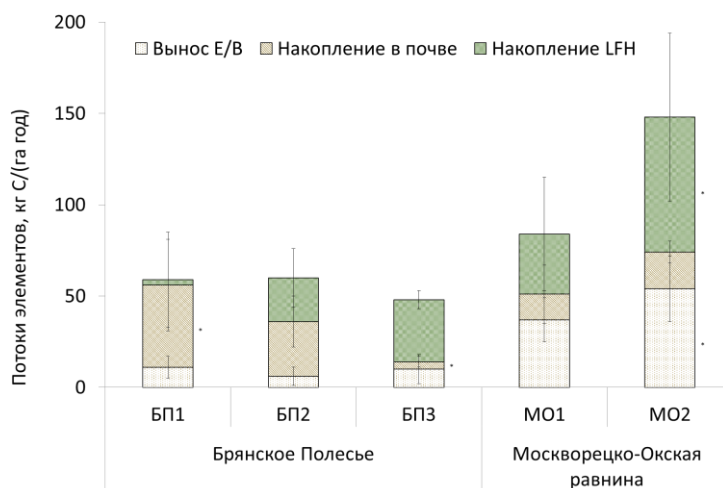


Рисунок 4. Потоки элементов (кг С/(га год)), характеризующие разницу между поступлением соединений углерода с атмосферными выпадениями и их выносом с почвенными водами. Зеленым – поглощение LFH, бежевым – накопление в верхних минеральных горизонтах почв, светло-бежевым – вынос из нижних минеральных горизонтов. БП1 – Брянское Полесье, сосняк кустарничково-зеленомошный (n=3), БП2 – Брянское Полесье, сосняк сложный (n=3), БП3 – Брянское Полесье, полидоминантный широколиственный лес с елью (n=3), МО1 – Москворецко-Окская равнина, березово-липовый лес (n=2), МО2 – Москворецко-Окская равнина, широколиственно-еловый лес (n=2). Звездочками отмечена значимость различий между средним по категории и общим средним: * — $p \leq 0.1$.

Оценка поглощения углерода (рис.4) в подстилке на основании разницы поступления углерода и его выноса показывает, что имеется тенденция к более высокому поглощению углерода в подстилке МО2. Различий в накоплении углерода в минеральных горизонтах, полученных на основании разницы выноса углерода из подстилки и нижних минеральных горизонтов, не выявлено.

При сравнении разных регионов исследования более высокое поступление углерода с атмосферными выпадениями отмечено в лесах МО (116 ± 35 кг С/(га год)) по сравнению с лесами БП (56 ± 3 кг С/(га год)). Вынос углерода с подстилочными водами как в лесах МО, формирующихся на суглинистых почвообразующих породах, так и в лесах БП, формирующихся на песчаных почвообразующих породах, отличался высокой вариабельностью и составлял в среднем 44 ± 10 кг С/(га год) при варьировании от 8 кг С/(га год) до 100 кг С/(га год) в разных типах леса БП и при варьировании от 48 кг С/(га год) до 98 кг С/(га год) в разных типах леса МО. Потоки углерода из нижних минеральных горизонтов в лесах МО были значительно выше, чем в лесах БП, составляя 46 ± 10 кг С/(га год) и 9 ± 3 кг С/(га год), соответственно. Высокая разница в поступлении и выносе углерода может быть связана с более высоким объемом осадков на

объектах Москворецко-Окской равнины при более высоких средних температурах воздуха в Брянском Полесье. Оценка поглощения углерода (рис.4) в подстилке на основании разницы поступления углерода и его выноса показывает, что имеется тенденция к более высокому поглощению углерода в подстилке в лесах Москворецко-Окской равнины, формирующихся на суглинистых почвообразующих породах. Отмечена тенденция к более высокой концентрации РОУ в почвенных водах хвойных лесов (с преобладанием сосны и ели), что может быть обусловлено как мощной подстилкой, отличающейся низким качеством опада, так и высоким уровнем поступления РОУ с кроновыми водами. Различий в поглощении углерода в минеральных горизонтах, полученных на основании разницы выноса углерода из подстилки и нижних минеральных горизонтов, не выявлено.

ВЫВОДЫ

1. В ходе проведенных в хвойно-широколиственных лесах исследований подтверждено влияние климатических условий и почвообразующих пород на запасы почвенного углерода. Леса Северо-Западного Кавказа, формирующиеся в наиболее благоприятных климатических условиях на суглинистых почвообразующих породах, отличались самым высоким запасом углерода в почвах (111 т/га) в слое FH-50 см. Самым низким запасом углерода в почвах характеризовались леса Брянского Полесья (52 т/га), формирующиеся на песчаных почвообразующих породах. Леса Москворецко-Окской равнины, формирующиеся на суглинках, аккумулируют в почвах больше углерода (85 т/га), чем леса Брянского Полесья, но меньше, чем леса Северо-Западного Кавказа. Доля FH-слоя в общем запасе углерода снижалась от 19% в лесах Брянского Полесья до 3% в лесах Северо-Западного Кавказа и 2% в лесах Москворецко-Окской равнины.

2. Установлено влияние типов леса на запасы почвенного углерода в лесах разных регионов. Наибольший вклад типов леса в вариацию запасов углерода в подстилке обнаружен в равнинных лесах, а в минеральных горизонтах - в горных лесах, что связано с более контрастными различиями качества опада в разных типах леса, в составе которых старовозрастные (более 450 лет) древостои. Самый высокий вклад типа леса в варьирование запасов углерода в минеральном профиле почв равнинных и горных лесов обнаружен в верхнем слое 0–30 см.

3. Запасы почвенного углерода в слое FH-50 см варьировали в зависимости от типа леса от 44 до 62 т/га в Брянском Полесье, от 74 до 98 т/га на

Москворецко-Окской равнине, и от 77 до 136 т/га на Северо-Западном Кавказе. Самыми высокими запасами углерода на объектах всех трех регионов отличались полидоминантные леса с высоким функциональным разнообразием растений, продуцирующих смешанный опад, состоящий как из быстро, так и из медленно разлагающихся компонентов, что может создавать благоприятные как топические, так и трофические условия функционирования почвенной биоты, способствующей накоплению углерода в почвах.

4. Информативными предикторами изменения запасов углерода в почве оказались видовая насыщенность древесных растений в ярусе трав, которая является интегральным показателем разнообразия всех древесных растений, доминирующих как в современный период, так и в прошлом, а также показатели качества подгоризонта опада подстилки, такие как степень насыщенности основаниями и отношение C/N. Увеличение содержания элементов питания в подгоризонте опада способствует возрастанию скорости его разложения почвенной биотой, что приводит к уменьшению массы органического горизонта и, соответственно, запасов углерода в нем и к интенсивной миграции соединений углерода в минеральные горизонты почв.

5. Оценка миграции соединений углерода с природными водами показала, что в лесах с доминированием видов хвойных древесных деревьев, формирующихся как на песчаных, так и на суглинистых почвообразующих породах, концентрации растворимого органического углерода в почвенных водах существенно выше, чем в лесах с доминированием видов широколиственных деревьев, что обусловлено различиями в мощности подстилки и в поступлении органических соединений с кроновыми водами. Вынос углерода с подстилочными водами как в лесах Москворецко-Окской равнины на суглинках, так и в лесах Брянского Полесья на песках, отличался высокой вариабельностью (от 36 до 74 кг С/ га в год) и достигал максимума в лесах с доминированием хвойных, для которых характерна мощная подстилка.

6. Поступление соединений углерода с атмосферными выпадениями в лесах Москворецко-Окской равнины значительно выше, чем в лесах Брянского Полесья: 116 и 56 кг С/ га в год, соответственно. Вынос соединений углерода из нижних минеральных горизонтов в лесах Москворецко-Окской равнины также значительно выше и составлял 46 против 9 кг С/га в год в Брянском Полесье. Значительная разница в поступлении и выносе углерода может объясняться более высоким объемом осадков на объектах Москворецко-Окской равнины при более высоких средних температурах воздуха в Брянском Полесье.

Список опубликованных работ по теме диссертации

Статьи в рецензируемых научных журналах

1. Казакова А.И. (**Кузнецова 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 Московского университета. Серия 17: Почвоведение. 2018. № 3. С. 9–15. (*Перечень ВАК*)
2. Горнов А.В., Горнова М.В., Тихонова Е.В., Шевченко Н.Е., **Кузнецова А.И.**, Ручинская Е.В., Тебенкова Д.Н. Оценка сукцессионного статуса хвойно-широколиственных лесов европейской части России на основе популяционного подхода // Лесоведение. 2018. № 4. С. 243–257. (*Перечень ВАК, Scopus*)
3. **Кузнецова А.И.**, Лукина Н.В., Тихонова Е.В., Горнов А.В., Горнова М.В., Смирнов В.Э., Гераськина А.П., Шевченко Н.Е., Тебенкова 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. (*Перечень ВАК, Scopus, WoS*)
4. Шевченко Н.Е., **Кузнецова А.И.**, Тебенкова Д.Н., Смирнов В.Э., Гераськина А.П., Горнов А.В., Тихонова Е.В., Лукина Н.В. Сукцессионная динамика запасов почвенного углерода и растительности хвойно-широколиственных лесов Северо-Западного Кавказа // Лесоведение. 2019. № 3. С. 163–176. (*Перечень ВАК, Scopus*)
5. **Кузнецова А.И.**, Лукина Н.В., Горнов А.В., Горнова М.В., Тихонова Е.В., Смирнов В.Э., Данилова М.А., Тебенкова Д.Н., Браславская Т.Ю., Кузнецов В.А., Ткаченко Ю.Н., Геникова Н.В. Запасы углерода в песчаных почвах сосновых лесов на западе России // Почвоведение. 2020. № 8. С. 959–969. (*Перечень ВАК, Scopus, WoS*)
6. **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. No. 9. Paper 1179. (*Scopus, WoS*)

Статьи в других научных изданиях

7. **Кузнецова А.И.**, Лукина Н.В., Тебенкова Д.Н., Смирнов В.Э. Оценка запасов углерода в почвах хвойно-широколиственных лесов на разных стадиях послерубочных восстановительных сукцессий // Аккумуляция углерода в

лесных почвах и сукцессионный статус лесов. Под ред Н.В. Лукиной. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2018. С. 99–121.

8. **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.

9. **Кузнецова А.И.** Влияние растительности на запасы почвенного углерода в лесах (обзор) // Вопросы лесной науки. 2021. № 4. С. 41–95.

10. **Кузнецова А.И.**, Лукина Н.В., Гераськина А.П., Тихонова Е.В., Горнов А.В., Шевченко Н.Е., Горнова М.В., Тебенькова Д.Н., Смирнов В.Э. Динамика запасов почвенного углерода горных и равнинных хвойно-широколиственных лесов европейской части России в ходе их сукцессионного развития // Матэрыялы V Міжнароднай навуковай канферэнцыі. Мінск – Белавежская пушча, 8 – 12 кастрычніка 2018 г. Мінск: Колорград, 2018. С. 58–59.

11. **Кузнецова А.И.**, Лукина Н.В., Орлова М.А., Горнов А.В., Горнова М.В., Тебенькова Д.Н. Сравнительная оценка выноса растворенного органического углерода с почвенными водами в северотаежных и хвойно-широколиственных лесах европейской части России // Научные основы устойчивого управления лесами: Материалы III Всеросс. (с междунар. участием) научной конференции (г. Москва, 30 октября – 1 ноября 2018 г.). М.: ЦЭПЛ РАН, 2018. С. 70–71.

12. **Кузнецова А.И.**, Горнова М.В., Тебенькова Д.Н., Катаев А.Д. Динамика состава атмосферных выпадений и почвенных вод в течение вегетационного периода в хвойно-широколиственных лесах // Почвоведение – мост между науками. Материалы Международной научной конференции XXI Докучаевские молодежные чтения (г. Санкт-Петербург, 28 февраля – 03 марта 2018 г.). СПб., 2018. С. 51–53.

13. **Кузнецова А.И.**, Ершов В.В., Лукина Н.В., Горнов А.В., Горнова М.В., Тебенькова Д.Н. Оценка выноса углерода с почвенными водами в сосновых лесах северотаежной и хвойно-широколиственной зоны // Научные основы устойчивого управления лесами. Материалы IV Всероссийской научной конференции с международным участием (г. Москва, 27–30 октября 2020 г.). М.: ЦЭПЛ РАН, 2020. С. 70–72.

14. **Кузнецова А.И.**, Лукина Н.В., Горнов А.В., Горнова М.В., Тебенькова Д.Н. Запасы почвенного углерода и растворенный органический углерод в хвойно-широколиственных лесах Брянского Полесья // Отражение био-

, гео-, антропосферных взаимодействий в почвах и почвенном покрове. Сборник материалов VII Международной научной конференции, посвященной 90-летию кафедры почвоведения и экологии почв ТГУ (г. Томск, 14–19 сентября 2020 г.). Томск, 2020. С. 127–131.

15. **Кузнецова А.И.**, Лукина Н.В., Горнов А.В., Горнова М.В., Тихонова Е.В., Смирнов В.Э., Данилова М.А., Тебенькова Д.Н. Факторы накопления углерода в сосновых лесах на песчаных почвах на западе России // Почвоведение: горизонты будущего 2020. Сборник тезисов четвертой открытой конференции молодых ученых Почвенного института имени В.В. Докучаева (г. Москва, 11–14 февраля 2020 г.). М., 2020. С. 150–151.