

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)

Диссертация на соискание ученой степени кандидата биологических наук

Научный руководитель:

член-корреспондент РАН, д.б.н., профессор

Лукина Наталья Васильевна

Москва

2022

Оглавление

Введение.....	3
Глава 1. Современное состояние проблемы.....	9
1.1 Основные механизмы аккумуляции почвенного органического вещества	9
1.2 Механизмы, связанные с влиянием растительности на запасы почвенного углерода на экосистемном уровне.....	17
1.3. Существующие оценки запасов углерода в хвойно-широколиственных лесах.....	26
Выводы.....	30
Глава 2. Объекты и методы.....	32
2.1 Объекты исследования.....	32
2.2. Методы исследования.....	49
Глава 3. Запасы углерода в почвах хвойно-широколиственных лесов и факторы его накопления.....	60
3.1 Оценка вклада различных факторов в варьирование запасов углерода в почвах хвойно-широколиственных лесов.....	60
3.2 Состав растительности и запасы почвенного углерода.....	72
3.3 Качество опада и запасы углерода в почве.....	74
Выводы.....	77
Глава 4. Миграция углерода с природными водами в доминирующих типах хвойно-широколиственных лесов.....	78
4.1 Содержание углерода в атмосферных выпадениях и в почвенных водах	79
4.2 Оценка годовых потоков углерода в атмосферных выпадениях и почвенных водах.....	85
Выводы.....	88
Заключение.....	91
Список литературы.....	94
Приложение 1.....	119
Приложение 2.....	127

ВВЕДЕНИЕ

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; Щепашенко 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 кроновыми 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.

Положения, выносимые на защиту:

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 кроновыми 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-, Антропоферных 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).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 15 печатных работ, в том числе 5 работ в изданиях из перечня ВАК, 6 тезисов докладов на Международных и Всероссийских научных конференциях, 6 статей зарегистрированы в системе цитирования Scopus и/или в Web of Science, в том числе 1 в высокорейтинговом журнале 1 квартиля.

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

1.1 ОСНОВНЫЕ МЕХАНИЗМЫ АККУМУЛЯЦИИ ПОЧВЕННОГО ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА

1.1.1 Основные механизмы перевода углерода из пула растительности в пул почв

Запасы углерода в почве представляют собой результат процессов поступления органического вещества в почвы и потерь соединений углерода в результате разложения, вымывания и выщелачивания (рис. 1). Источником органического вещества является растительный материал как надземных, так и подземных органов. Другие поступления соединений углерода — это стволовые и кроновые воды, также воды, промывающие напочвенный покров, корневые выделения, включая экссудаты корней растений и связанных с ними симбионтов (например, микоризный грибной мицелий), а также фекальный материал и тела представителей почвенной биоты. Попав в почву или на нее, органические материалы постепенно трансформируются почвенной фауной и микроорганизмами (грибами, бактериями и археями). Внеклеточные ферменты, выделяемые микроорганизмами, разлагают материал на более простые соединения, которые могут быть ассимилированы. Постепенно растительное органическое вещество минерализуется или накапливается в биомассе консументов, редуцентов или в их метаболитах, часть которых выделяется из клеток и может быть стабилизирована. Остальная часть некоторых стабильных биомолекул растений, включая липиды, лигнины и сахара, также может быть стабилизирована минералами и агрегатами.

Поскольку растительность является основным поставщиком органического вещества, рассмотрим основные механизмы перехода углерода из пула растительности в пул почв. Отмечают в основном три пути.

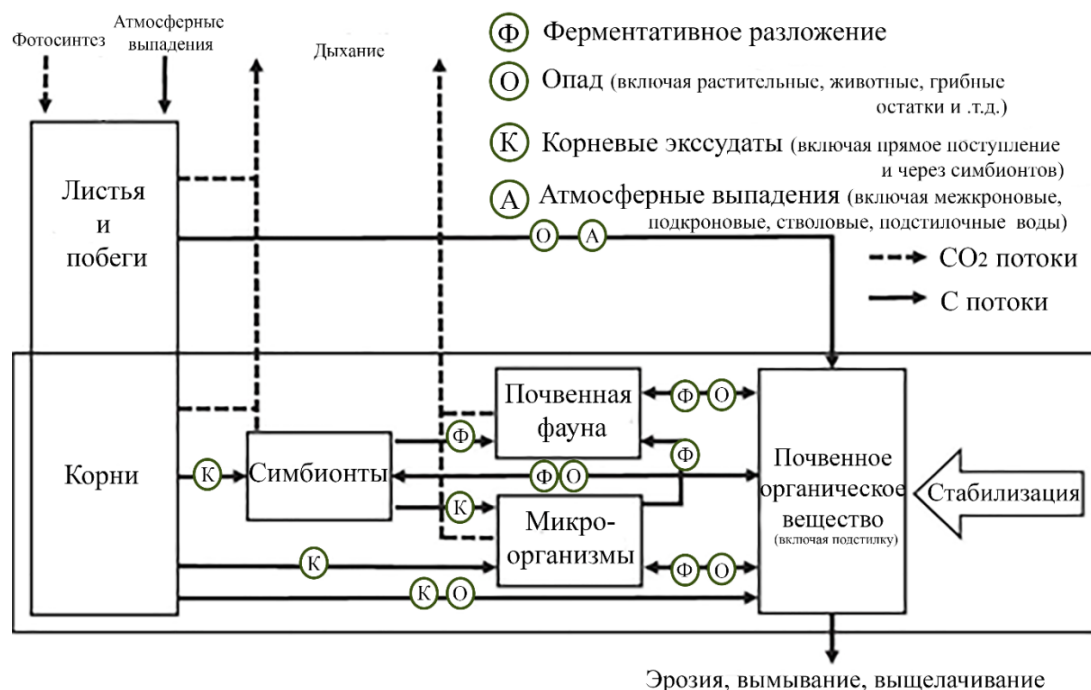


Рисунок 1. Поток углерода в лесной экосистеме по Mayer et al. (2020) с изменениями

1. Переработка надземного и подземного опада почвенной фауной и микробиотой. Механически разрушая, а также смешивая опад с подстилкой и минеральной частью почв, почвенная фауна может способствовать пространственному перераспределению и первичной деструкции растительного материала (Brussaard, 1997; Frouz et al., 2013). При дальнейшей переработке органического вещества почв (ОВП) редуцентами, в особенности микробиотой, подстилка претерпевает химические и структурные изменения (Frouz, 2018). Например, деятельность дождевых червей может, как усиливать преобразование подстилки в более стабильные органоминеральные агрегаты, так и способствовать ускорению деградации ОВП (Wolters, 2000; Fox et al., 2006), что может быть учтено при разделении макрофауны на функциональные типы (Гераськина, 2020).

Трансформация опада почвенной биотой значительно отличается в разных климатических условиях, поскольку температурный и водный режимы являются лимитирующими факторами для многих редуцентов. В северном полушарии в бореальных лесах в условиях низких температур и

гумидного водного режима в основном преобладает грибное разложение, что способствует накоплению подстилки, формированию грубых форм гумуса типа мор и модер. В более южных регионах интенсивность биологического круговорота возрастает, наряду с грибным разложением возрастает доля бактериального разложения и вклада почвенных животных, что способствует более интенсивному разложению опада, гумификации подстилки и верхних органогенных горизонтов почв.

2. Вертикальная стратификация корней деревьев (Brassard et al., 2011), корневой опад (Brassard et al., 2013) и его оборот (root turnover) (Brassard et al., 2011; Lei et al., 2012) и корневые экссудаты (Bardgett, 2005) способствуют успешной ассоциации органического вещества с почвенными агрегатами или глинистыми минералами. Некоторые ученые предполагают, что большая часть ОВП происходит из корней, и этот источник становится все более значимым с глубиной (Rasse et al., 2005), поскольку разные типы корневых систем обеспечивают возможность вертикальной стратификации корней деревьев и перераспределение ризосферы в глубокие минеральные горизонты. Опад корней обычно разлагается медленнее, чем опад из листьев того же вида (Lauenroth and Gill, 2003; Cusack et al., 2009), что приводит к тому, что более устойчивые соединения углерода корней имеют более длительное время пребывания в почве, чем соединения углерода надземных побегов (Rasse et al., 2005). К ключевым механизмам, которые приводят к стабилизации углерода корней в почве, относят (1) химическую стойкость корней, частично обусловленную присутствием стойкого соединения суберина, (2) физическую защиту в агрегатах и (3) физико-химическую защиту лигнина и реактивных соединений углерода в почве (корневых экссудатов), связанных с глинистыми минералами. Однако возможен и обратный эффект: лабильный С, выделяемый из корней, может стимулировать разложение уже стабильного ОВП (Kuzyakov and Domanski, 2000; Dijkstra and Cheng, 2007).

При сравнении разных биомов установлены глобальные закономерности в скорости обновления корневых систем между группами растений и в зависимости от климатических градиентов. Поскольку скорость обновления корней увеличивается экспоненциально со средней годовой температурой (Gill and Jackson, 2000), можно ожидать более значительный вклад корневого опада в стабилизацию углерода в более южных регионах.

3. Выщелачивание растворенного органического вещества (РОУ) из живых растений и лесной подстилки — еще один путь проникновения соединений углерода в более глубокие горизонты почвы (Fröberg et al., 2011). Потоки выщелачивания РОУ обычно выше непосредственно под лесной подстилкой и часто связаны с микробной активностью и биомассой (Smolander and Kitunen, 2002). Также высокие потоки РОУ в минеральную часть почвы наблюдаются в лесах с высоким содержанием углерода подстилки, например, сформированных елью обыкновенной. На примере еловых лесов европейской части России показано, что при концентрации углерода в почвенном растворе 35 мг/л и выше водорастворимые органические вещества начинают сорбироваться в горизонте BF (Караванова и др., 2020). Производные лигнина — фенолы — в растворенных органических веществах, движущихся вниз по профилю почвы, преимущественно сохраняются на поверхностях оксидов и гидроксидов в неглубоких слоях почвы (Kaiser and Zech, 2000; Kaiser et al., 2004). Перемещение РОУ из верхних горизонтов почв в более глубокие может приводить к стабилизации и, следовательно, к значительному увеличению депонирования С в почве (Kalbitz and Kaiser, 2008). Особенно ярко это может проявляться в условиях избыточного увлажнения, где возможно увеличение потока РОУ растительного происхождения и его закрепление (Mikutta et al., 2019). Однако возможен и обратный эффект: оценки выноса РОУ из сосновых лесов умеренного пояса в Бельгии (около 10 г/м² в год) показали, что РОУ может составлять 11% от экосистемной нетто продуктивности (Gielen et. al., 2011).

Потоки углерода в лесах могут значительно отличаться на севере и на юге, поскольку известно, что климатические условия могут оказывать значительное воздействие как на величину РОУ, так и на интенсивность его выноса (Gmach et al., 2020). С одной стороны, в южных регионах интенсивность биологического круговорота выше, чем на севере, что способствует активному разложению подстилки и высвобождению РОУ. С другой стороны, при длительных засушливых периодах может происходить снижение скорости разложения подстилки, при этом могут накапливаться вторичные метаболиты (Kalbitz et al., 2000).

Таким образом, выявлено три основных способа перевода углерода из пула растительности в пул почв. При этом отсутствуют оценки вклада каждого из этих механизмов или их комбинированного влияния. Установлено, что в северных и южных регионах (северного полушария) интенсивность данных процессов проявляется по-разному. Ожидается более высокий вклад РОУ в накопление органического вещества в северных экосистемах, поскольку они формируются при высоком уровне поступления осадков и отличаются сильно развитой подстилкой. Преобладание грибного разложения также способствует накоплению подстилки. В то же время весьма значительным может быть влияние корневого опада, особенно, если учесть влияние не только древесных растений, но и широко распространенных в таежных лесах кустарничков и другой растительности напочвенного покрова. В более южных хвойно-широколиственных лесах потоки РОУ значительно меньше, чем в таежных. Однако увеличение биомассы и активности почвенной фауны увеличивает ее вклад в переработку опада и последующую стабилизацию ОВП в минеральной части профиля. Повышение общей продуктивности корней наряду с влиянием сапрофагов, возможно, является главным механизмом более интенсивного образования стабильного углерода в минеральных горизонтах почв хвойно-широколиственных лесов. Однако все эти предположения носят гипотетический характер и требуют дополнительного изучения.

1.1.2 Основные механизмы закрепления углерода в составе ОВП

Депонирование углерода в почвах не является новым аспектом исследования биогеохимического цикла углерода в рамках проблемы глобальных изменений климата и наземных экосистем. Уже в 1990-е годы появляются работы, показывающие важность почв как стока углерода при повышенных концентрациях CO₂ в атмосфере.

Секвестрирующая емкость почвы (углеродпротекторная емкость почвы (Carbon Protection Capacity, CPC) отражает ее способность стабилизировать и удерживать в составе ОВП поступивший с органическими материалами углерод (Семенов и др., 2009; Когут, Семенов, 2020).

В настоящее время признаются два основных механизма стабилизации органического вещества в почвах: за счет образования органоминеральных комплексов (Семенов, Когут, 2015) и за счет образования почвенных агрегатов (Six et al., 2002, 2004; von Lützow et al., 2006; Gunina et al., 2015).

Органоминеральные комплексы формируются в результате физико-химических взаимодействий между молекулами органического вещества и минеральными компонентами почвы, повышая защиту этого ОВП от разложения (von Lützow et al., 2006). Например, образование высокомолекулярных гуминовых веществ; связывание гидрофильных компонентов свежего органического вещества гидрофобными центрами гуминовых веществ, а аминокислот — полифенолами; формирование органоминеральных комплексов алюминия и железа, кальция; формирование органоминеральных комплексов в минеральных матрицах глинистых частиц. В этих процессах в основном участвуют тонкодисперсные глинистые и минеральные частицы, где высок вклад поверхностей реакционноспособных оксидов и филлосиликатов (Blume et al., 2015).

Почвенные агрегаты представляют собой однородные смеси минералов, органических соединений и органоминеральных комплексов. Например, микроагрегаты могут препятствовать физическому доступу микроорганизмов к ОВП внутри агрегатов, повышая его стабильность (Six et

al., 2004). Также возможна аккумуляция растворимого органического вещества в порах, размер которых меньше размера бактерий (Totsche et al., 2018).

Существует и третий, в настоящее время широко обсуждаемый механизм стабилизации ОВП — биохимическая защита за счет определенных химических свойств биомолекул. Установлено, что в лесных экосистемах основной частью ($\geq 50\%$) стабилизированного углерода являются биомолекулы растений, включая липиды, лигнин и сахара, что может составлять значительную часть органического вещества, защищенного минералами и агрегатами (Angst et al., 2021).

Считается, что биохимическая стойкость потенциально наиболее актуальна на начальных стадиях разложения и может играть лишь незначительную роль в долгосрочной защите ОВП в минеральной почве (Marschner et al., 2008). Однако некоторые биомолекулы могут быть «выборочно сохранены» в зависимости от термодинамических условий среды и их способности к стабилизации за счет физико-химических взаимодействий в почвенной матрице: например, лигнин (Feng et al., 2005), некоторые сахара (Amelung et al., 1999; Kiem and Kögel-Knabner, 2003) и липиды (Ludwig et al., 2015).

Поступление и последующая стабилизация ароматических и алифатических кислот, таких как мономеры лигнина и продуктов его окисления, зависит от доминирующей растительности. В хвойных лесах доминируют гваяциловые (ванилиновые) фенолы (Ковалев, Ковалева, 2016), которые сохраняются дольше во время начальных процессов разложения и имеют более высокую вероятность связывания с минеральными поверхностями (Clemente and Simpson, 2013). Широколиственным и мелколистственным лесам свойственны равные пропорции ванилинов и сирингилов (Ковалев, Ковалева, 2016). Главным источником ароматических фенольных соединений в почвах является лигнин надземной и подземной биомассы высших растений. При этом доминирующая роль принадлежит

подземным органам растений (Ковалев, Ковалева, 2016). Количество исследований по извлечению лигнина из интактных агрегатных структур невелико. Немногочисленные исследования указывают на большее содержание лигнина и низкую степень окисления лигнина в макроагрегатах по сравнению с микроагрегатами (Xiao et al., 2007; Thevenot et al., 2010). Установлено участие лигниновых фенолов в агрегатообразовании и в формировании конкреций в зависимости от окислительно-восстановительной обстановки почв (Ковалев, Ковалева, 2016).

Нейтральные сахара растительного происхождения (в основном полученные из гемицеллюлоз) являются предпочтительными микробными субстратами по сравнению с другими формами ОВП (Gunina and Kuzyakov, 2015), такими как лигнин, и, вероятно, способствуют накоплению микробной некромассы. Примечательно, что содержание в основном нейтральных сахаров растительного происхождения (например, ксилозы и арабинозы) в органоминеральных комплексах (52–128 мг С/г) может превышать содержание лигнина в несколько раз (Kiem and Kögel-Knabner, 2003; Córdova et al., 2018). Нейтральные сахара растительного происхождения способны вносить существенный вклад (до 130 мг С/г) (Córdova et al., 2018) в стабилизацию ОВП.

Некоторые липиды растительного происхождения считаются относительно устойчивыми к деградации, включая длинноцепочечные n-алкановые кислоты, определенные мономеры кутина и суберина с группами гидроксильных и/или карбоновых кислот (Quenea et al., 2004; Angst et al., 2017; Анохина, 2020). Стабилизация липидов растительного происхождения посредством органоминеральных взаимодействий может зависеть от мономерного состава липидных биополимеров и химических свойств этих мономеров, а также состава микробной популяции, сорбционных свойств и минерального состава почв (Bull et al., 2000). Вклад липидов растительного происхождения в стабильный С составляет от ~ 2% до ~ 10% (т.е. ~ 20–100 мг липидов на г С (Angst et al., 2021). Исследования по извлечению этих

соединений из агрегатов единичны и предполагают нахождение алканов в почве в составе капсул самостоятельной фазы липидов (Анохина, 2020). Для разных типов леса отмечены различия в количественном и качественном составе липидного состава органофилия.

Таким образом, растительность как основной источник поступления органического вещества в почву, определяет возможность и скорость образования и стабилизации почвенного органического вещества. Подчеркивается значительный прямой вклад растительности в аккумуляцию ОВП. В то время как механизм стабилизации углерода за счет образования органоминеральных комплексов достаточно изучен и имеет количественные оценки, механизмы, связанные с изучением физической защиты органического вещества в почвенных агрегатах и биохимической устойчивости растительных соединений, требуют особого внимания.

1.2 МЕХАНИЗМЫ, СВЯЗАННЫЕ С ВЛИЯНИЕМ РАСТИТЕЛЬНОСТИ НА ЗАПАСЫ ПОЧВЕННОГО УГЛЕРОДА НА ЭКОСИСТЕМНОМ УРОВНЕ

Учитывая особенности биогеохимического цикла углерода в лесных экосистемах (рис. 1) и основные механизмы поступления и стабилизации органического вещества в почвах, можно выделить три основных механизма влияния растительности на динамику запасов почвенного углерода на экосистемном уровне: (1) количество и (2) качество опада как отдельных видов растений (идентичность вида), так и их совместное влияние, т.е. (3) биоразнообразие сообщества, и не только растительного, но и представителей редуцентов и консументов.

Количество опада является важным предиктором накопления углерода (Grandy and Neff, 2008; Gentile et al., 2011; Carrington et al., 2012; Dungait et al., 2012), поскольку растительность является основным поставщиком органического вещества в почву. Количество продуцируемого опада пропорционально чистой первичной продуктивности лесов в естественных

лесах, т. к. опад является частью чистой первичной продукции (Chen et al., 2017).

Качество опада зависит от видового и возрастного состава растительности, стадий ее онтогенетического развития и определяется содержанием элементов питания (азот, фосфор, калий и др.) и вторичных метаболитов (полифенолы, лигнины, целлюлоза, гемицеллюлоза и др.) (Berg et al., 1993; Cadisch and Giller 1997; Perez-Harguindeguy et al., 2000; Berg and McClaugherty, 2020). На основе качества опада предлагается оценивать функциональное разнообразие растений (Cornelissen et al., 2007). Предложена концепция связи накопления почвенного углерода и качества опада, согласно которой опад высокого качества не всегда с большей эффективностью способствует повышению стабильного органического вещества почв по сравнению с опадом низкого качества (Castellano et al., 2015).

Одним из аспектов экосистемного биоразнообразия является структурное биоразнообразие, характеризующее пространственную организацию растительности (вертикальная и горизонтальная структура) и связанной с ней другой биоты, определяющую пространственные вариации поступления углерода, во-первых, при регулировании проникновения и опадания в органический слой органических остатков, а во-вторых, через влияние на гидротермический режим органического слоя, то есть на динамику температуры и содержания воды, что в свою очередь может влиять на разложение в большей степени, чем различия в макроклиматических условиях в континентальном масштабе (Joly et al., 2017).

Все аспекты биоразнообразия (типологическое, видовое, функциональное, структурное) определяют динамику углерода в лесах и его количественные и качественные характеристики.

Рассмотрим влияние представленных выше трех механизмов на цикл углерода на разных пространственных уровнях.

Оценки связи запасов углерода и количества опада обычно опосредованы и проводятся через изменение продуктивности. В

исследовании Роберта Амундсона (Amundson, 2001) отмечается тренд увеличения запасов почвенного углерода в лесах с повышением среднегодовой температуры, среднегодовой суммы осадков и, соответственно, чистой первичной продуктивности.

Известно, что продуктивность древесных растений в северном полушарии закономерно уменьшается с юга на север (Уткин, 1975). Также отмечается, что количество опада увеличивается с уменьшением широты (Albrektson, 1988).

Качество опада как хвойных, так и лиственных деревьев может меняться в зависимости от климатических условий. Выявлена связь концентрации N и среднегодовой температуры и годового количества осадков; установлено, что как для хвойных, так и для лиственных видов деревьев общая концентрация N в опаде возрастает с увеличением гидротермических показателей (Berg and McClaugherty, 2020). Считается, что на региональном уровне температура является ведущим фактором в определении скорости разложения подстилки (Meentemeyer, 1978; Hobbie, 1996). Однако при исследовании скорости разложения наземного опада с учетом климатического градиента отмечается, что в бореальных лесах около 16% разложения можно объяснить концентрацией азота (Dyer et al., 1990). При исследовании скорости разложения подземного опада с учетом климатических характеристик показано, что химический состав корней является основным регулятором процессов разложения, в то время как климатические и экологические факторы имели второстепенное значение (Silver and Miya, 2001). Показано, что качество опада может быть более значимым предиктором разложения подстилки по сравнению с гидротермическими характеристиками (Swift et al., 1979; Berg, 2000), особенно на начальных этапах ее разложения (Canessa et al., 2021).

Исследования показывают, что разнообразие видов древесных растений увеличивает продуктивность леса за счет большей пространственной комплементарности крон деревьев, что, в свою очередь,

обеспечивает положительную взаимосвязь между разнообразием видов деревьев и продуктивностью опада (Zheng et al., 2019). Количество опада повышалось с увеличением видового богатства. Данные о связи возраста деревьев и количества опада противоречивы. В некоторых публикациях отмечена положительная связь возраста и количества опада в первые 98 лет развития соснового сообщества с последующим выходом функции на плато (Chen et al., 2017), в других исследованиях количество опада уменьшалось с увеличением возраста древостоя (Albrektson, 1988). Также отмечается, что количество опада может увеличиваться с увеличением плодородия почв (Albrektson, 1988). В хвойно-широколиственных лесах влияние возраста на количество опада отмечено не было (Huang et al., 2017).

Опад низкого качества характеризуется низким содержанием оснований, высокой кислотностью, высоким содержанием лигнина и других вторичных метаболитов, а также широким отношением C/N. Опад хвойных деревьев характеризуется низким содержанием азота, например, опад сосны содержит часто ниже 0.4% азота (Berg and McClaugherty, 2020), опад бореальных кустарничков богат полифенольными соединениями (Wardle et al., 2003), зеленые мхи характеризуются низким содержанием питательных элементов (Hilli, 2013).

Опад высокого качества характеризуется высоким содержанием оснований, низкой кислотностью, узким C/N. Опад лиственных деревьев богат азотом: например, опад березы содержит 0.7%, бука — 0.9%, осины — 1.0%, граба — 1.1%, дуба — 1.2%, клена — 1.3%, липы — 1.5% (Simon et al., 2018). Чем богаче опад элементами питания, тем быстрее разлагается подстилка почвенной биотой, что приводит к снижению ее запаса и, соответственно, запасов углерода в ней.

Уже в 1990-х годах было признано, что доступность азота является основным определяющим фактором, контролирующим реакцию почвенного углерода на климатические изменения в экосистемах, лимитирующим фактором развития которых является азот (Nohrstedt, 1992; Diaz et al., 1993).

В ряде работ показано, что добавление азота стимулирует разложение опада высокого качества, но замедляет или предотвращает разложение опада с низким качеством (Knorr et al., 2005), что обусловлено, с одной стороны, подавлением активности лигнолитических ферментов (Carreiro et al., 2000), а с другой стороны — увеличением количества микроорганизмов (Córdova et al., 2018). Существуют также доказательства того, что азот стабилизирует органическое вещество в почве (Neff et al., 2002; Swanston et al., 2004) и препятствует минерализации углерода, накопленного ранее (Hagedorn et al., 2003). Лиственные породы, в частности вяз, дуб и тополь, могут рассматриваться как мелиоративные виды, ускоряющие круговорот питательных веществ в сосновых насаждениях (Polyakova and Billor, 2007).

При сравнении скорости разложения опада продемонстрировано влияние функциональных характеристик растений, связанных с филогенетическими группами. Установлено более быстрое разложение опада древесных лиственных пород по сравнению с хвойными, а также более быстрое разложение видов трав по сравнению со злаковыми. Отмечены медленные темпы разложения папоротников и мохообразных (Cornwell et al., 2008).

Однако наиболее распространенными предикторами скорости разложения подстилки являются относительные показатели, такие как отношение C/N, а также и содержание элементов питания в подстилке (Zhang et al., 2008). В ряде европейских (Lovett et al., 2004; Reich et al., 2005; Oostra et al., 2006) и североамериканских исследований (Finzi et al., 1998; Neiryneck et al., 2000; Dijkstra and Fitzhugh, 2003; Hagen-Thorn et al., 2004) растений родов *Fraxinus*, *Acer*, *Quercus* и *Fagus* показаны отличия в запасах углерода подстилки и соотношении C/N как индикатора скорости накопления подстилки. Ясень и клен объединяются в группу растений с высоким качеством опада, то есть высоким содержанием азота в опаде, что приводит к низким накоплениям С в подстилке из-за высокой скорости разложения. Дуб и бук характеризуются относительно низким содержанием N в опаде,

приводящем к его низкому содержанию в лесной подстилке и широкому отношению C/N, низкой скорости разложения, что ведет к увеличению запасов C в лесной подстилке. При сравнении видов хвойных и лиственных деревьев установлено, что ель характеризуется самым широким отношением C/N и запасами углерода в подстилке, формируемой с ее участием, соответственно (Vesterdal et al., 2008). В то же время как при сравнении видов хвойных между собой показано, что подстилка сосновых лесов часто отличается гораздо более широким отношением C/N, чем еловых (Lukina et al., 2020). Несколько исследований подтвердили эффективность отношения лигнин/N подстилки в прогнозировании скорости разложения подгоризонта опада подстилки, формируемого разными видами (Gower and Son, 1992; Heim and Frey, 2004). Показано, что отношение лигнин/N уменьшается в следующем порядке: ель, бук > дуб > клен, липа > ясень (Melillo et al., 1982; Lovett et al., 2004; Sariyildiz and Anderson, 2005; Kalbitz et al., 2006; Cotrufo et al., 2013).

Опад высокого качества, т. е. обогащенный питательными веществами, минимальным соотношением C/N и содержанием лигнина, обычно разлагается быстрее, чем опад низкого качества (дефицит питательных элементов, много лигнина). Однако вклад быстро и медленно разлагающихся фракций опада в накопление ОВП в настоящее время ясен не до конца (Castellano et al., 2015).

Считается, что медленно разлагаемый материал подстилки способствует накоплению углерода в почве больше, чем более быстро разлагаемый (Swift et al., 1979), особенно в органогенных горизонтах почв, поскольку опад низкого качества медленно перерабатывается почвенной биотой (Стриганова, 1980; Prescott et al., 2000; Huang et al., 2020 и др.) и способствует росту грибов и их вкладу в стабилизацию углерода на минеральной матрице (Six et al., 2004; Soares and Rousk, 2019). Однако результаты других исследований показывают, что смешивание медленно разлагаемой подстилки с низким качеством опада и быстро разлагаемой

подстилкой с высоким качеством опада способствует более высокой эффективности переноса углерода в минеральные горизонты почв (Cotrufo et al., 2013; Córdova et al., 2018) в основном за счет увеличения потока РОУ из развитой подстилки (Fröberg et al., 2011) и за счет добавления легкодоступного азота быстроразлагаемых фракций опада. Показано, что содержание РОУ, особенно в поверхностных слоях почвы, положительно скоррелировано со скоростью разложения подстилки (Zhou et al., 2015). Отмечены закономерные связи запасов подстилки и потока РОУ: в лесах с высокой долей участия лиственных деревьев с менее развитой подстилкой отмечен менее интенсивный вынос РОУ (Fröberg et al., 2011). Также имеются данные о связи качественных и количественных характеристик РОУ и распределения корней.

Другим важным аспектом влияния качества опада является опад монодоминантных и смешанных лесов. Показано, что леса с более высоким разнообразием, то есть высокими показателями видовой насыщенности растений, отличаются более узким отношением C/N (Polyakova and Billor, 2007; Huang et al., 2017). Также имеются исследования о положительном влиянии функционального разнообразия растений на разложение опада (Patoine et al., 2017), поскольку совместное влияние опада разного качества может создавать особые благоприятные условия для деятельности почвенной биоты. Например, в ряде работ показано, что низкое качество опада ели, пихты объясняет накопление подстилки, являющейся местообитанием для сапрофагов, функционально связанных с ней (Кузнецова и др., 2019; Huang et al., 2020).

Совместное влияние видов проявляется при сравнении запасов углерода разных типов леса (Framstad et al., 2013; Lukina et al., 2020; Kuznetsova et al., 2021). Отличия могут быть связаны с разным соотношением растений древесного яруса. В почвах широколиственных лесов не удалось выявить существенных отличий между накоплением в них углерода в монокультурах в common garden экспериментах (Vesterdal et al., 2008).

Открытым остается вопрос о комбинированном влиянии нескольких видов древесных растений на запасы углерода. В.Н. Шанин с соавторами (Shanin et al., 2014), исследуя влияние богатства древесных пород бореальных лесов на их продуктивность и динамику углерода, показали, что смешанные леса более продуктивны, чем монодоминантные. Для хвойно-широколиственных лесов показано, что большее разнообразие древесных видов обуславливает увеличение запасов органического углерода в почве (Vesterdal et al., 2013). Однако существуют и иные оценки, указывающие на то, что на запасы углерода почвы в большей степени влияет идентичность видов деревьев по сравнению с их разнообразием (Dawud et al., 2016).

Чем выше разнообразие видов древесных растений, тем более смешанным становится опад. При этом опад хвойных в присутствии опада лиственных деревьев разлагается быстрее (Patoine et al., 2017), поэтому улучшается качество опада в целом, что способствует более интенсивному разложению и увеличению потоков углерода в минеральные горизонты. Манипуляции с соотношением видов с разным качеством опада широко распространены в практике климатически оптимизированного лесного хозяйства (Mayer et al., 2020).

Работы о связи разнообразия подпологовой растительности и напочвенного покрова и динамики углерода единичны. В бореальных лесах отмечено значительное увеличение запасов углерода в лесах, где вклад трав в общее проективное покрытие превышает 10% (Lukina et al., 2020). В хвойно-широколиственных лесах отмечена положительная связь содержания почвенного углерода и разнообразия деревьев в ярусе подпологовой растительности (Bakhshandeh-Navroud et al., 2018).

В отличие от бореальных лесов, где в напочвенном покрове в основном преобладают мхи и кустарнички и добавка трав значительно влияет на процессы аккумуляции углерода, в хвойно-широколиственных лесах, где в напочвенном покрове в основном преобладают травы, их влияние может быть менее выражено (Kuznetsova et al., 2021).

Имеется довольно много работ, оценивающих циклы углерода в разных элементах мозаики (Орлова и др., 2016; Лукина и др., 2018; Припутина и др., 2020 и др.). Гумификация листовой подстилки в окнах и подкроновых пространствах отличалась зимой и летом (Ni et al., 2015). Величина эмиссии выше в 4 раза в окнах старовозрастных еловых лесов по сравнению с подпологовым пространством (Карелин и др., 2017). Масса опада хвои значительно выше (7.5%) непосредственно под кронами деревьев. В то время, как характеристики качества опада (кислотность, содержание N и других элементов питания, отношение C/N) не показали каких-либо значительных различий при сравнении подкроновых и межкроновых пространств в 55-летних сосняках северо-западной Германии, в ряде работ показаны тенденции к более высокому уровню рН и содержанию питательных веществ в подкроновых пространствах в отличие от межкроновых (Penne et al., 2010; Орлова и др., 2016).

Работ, оценивающих влияние разных элементов мозаики, которые связаны с распределением подземных частей растений, как на динамику, так и на запасы углерода крайне мало (Liang et al., 2017; Sokol and Bradford, 2019). Известно, что для разных видов деревьев характерно различное распределение корней в почвенном профиле. Корневые системы ели обыкновенной поверхностного типа и располагаются в основном в лесной подстилке (Puhe, 2003). В минеральных горизонтах почв обнаружена небольшая масса корней (<5 мм) на глубине 0–20 см под елью и буком по сравнению с дубом и ясенем (Oostrа et al., 2006). Сообщалось также, что на глубине 16–30 см у ясеня относительно более тонкие корни, чем у дуба, а на глубине 0–15 см — наоборот (Ponti et al., 2004). При анализе качественного состава органического углерода с глубиной почвенного профиля отмечено возрастание содержания липидов, источником которых является подземный опад, по сравнению с содержанием липидов, источником которых был наземный опад (Nierop, 1998; Nierop et al., 2006; Feng and Simpson, 2007; Spielvogel et al., 2014; Angst et al., 2016). На примере как хвойных, так и

лиственных лесов показано, что опад корней может вносить сопоставимый с наземным опадом вклад в запас почвенного углерода (Rasse et al., 2005).

Регулирование процессов миграции соединений углерода с атмосферными выпадениями и почвенными водами в границах почвенного профиля также может быть связано со структурной организацией биогеоценоза (Ершов, 2021). По данным многолетних наблюдений, поступление соединений органического углерода с атмосферными выпадениями в северотаежных лесах под кронами сосны в 5-6 раз выше, чем в межкروновых пространствах на протяжении всего вегетационного периода, что может объяснять и различия в концентрациях углерода в почвенных водах (Лукина и др., 2018; Ершов и др., 2019). Значительный вынос углерода с почвенными водами характерен для хвойных лесов, особенно в межкроновых пространствах (Fröberg et al., 2011; Лукина и др., 2018; Аккумуляция..., 2018).

Таким образом, биоразнообразие лесов может влиять на циклы углерода, с одной стороны, через изменение качества и количества опада, а с другой стороны — через изменение физических условий среды (влажность, температура). Все это влияет на изменение активности почвенной биоты. Состав растительности определяет количество, качество и скорость разложения растительного опада, его горизонтальное распределение и распределение соединений углерода в пределах почвенного профиля (Gleixner, 2013), что определяет формирование запасов почвенного углерода.

1.3. СУЩЕСТВУЮЩИЕ ОЦЕНКИ ЗАПАСОВ УГЛЕРОДА В ХВОЙНО-ШИРОКОЛИСТВЕННЫХ ЛЕСАХ

На Россию приходится более 20% лесного покрова мира и более половины мировых ресурсов бореальных лесов мира. По существующим оценкам, на почвы лесных экосистем приходится около 46% общих запасов углерода в почвенном покрове России (Щепащенко и др., 2013). При этом

вклад лесных земель в азиатской и европейской частях страны различен и составляет 48 и 37% соответственно, что отражает уровень лесистости этих территорий. По оценкам Алябиной (2016 год) почвообразующий потенциал биоты для накопления углерода почвами в лесных экосистемах составляет свыше 800 кг С/(га год) в горных лесных районах Алтая, Западного Саяна и Южного Урала, а также в лесо-луго-тундровых биомах (Алябина, 2016).

Проведены оценки запасов почвенного углерода в лесах России на национальном (Честных и др., 2004, 2007; Щепашенко и др., 2013; Чернова и др., 2021) и региональном (Мажитова и др., 2003; Машика, 2005; Бобкова и др., 2014; Бахмет, 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.

Общие запасы углерода в автоморфных и полугидроморфных почвах с учетом гидроморфных почв болот в лесных районах Европейско-Уральской части площадью 181.13×10^6 га составляют 19.3×10^9 т С (Честных и др., 2020). Среди них для северотаежных лесов запасы углерода в слое 0–30 см, включая запасы углерода подстилки, органогенных и минеральных горизонтов, составляют $4.94 \pm 2.01 \times 10^9$ т С, в среднетаежных лесах — $2.92 \pm 0.93 \times 10^9$ т С, в южнотаежных лесах — $2.09 \pm 1.80 \times 10^9$ т С. Самые низкие запасы отмечены в зоне хвойно-широколиственных лесов — $1.02 \pm 0.67 \times 10^9$ т С, что авторы связывают либо с климатическими особенностями и широким распространением распахиваемых земель, либо с отсутствием данных по болотам в этом районе.

В автоморфных почвах на долю подстилки приходится в среднем 30% от общего запаса С в почвах с учетом слоя 0–30 см, а с учетом слоев 0–50 и 0–100 см она уменьшается соответственно до 24 и 18% (Чернова и др., 2020). Средний запас углерода подстилки зависит от природно-климатической зоны: отмечается тренд уменьшения запасов подстилки и запасов углерода в ней от подзоны северной тайги до подзоны хвойно-широколиственных лесов (Честных и др., 2007). Средний запас углерода подстилки составляет 11 т/га в

лесах северной тайги, 10 т/га в лесах средней тайги, 7 т/га в более южных регионах (Честных и др., 2007). Общие запасы углерода в лесной подстилке на всей территории России составляют от 5.3 Пг С (Честных и др., 2007) до 8.4 Пг С (Щепашенко и др., 2013).

В отличие от запасов углерода подстилки показано более интенсивное накопление углерода в минеральных горизонтах автоморфных почв южных регионов по сравнению с северными. Например, запасы углерода подстилки в сосняках черничных закономерно уменьшались от 47 ± 8 т/га в северной тайге до 8 ± 1 т/га в хвойно-широколиственных лесах, а запасы в слое 0–10 см, характеризующем гумусово-аккумулятивный горизонт, напротив, повышались от 8 ± 1 до 18 ± 2 т/га (Кузнецова и др., 2020).

В бореальных лесах европейской части России средний запас углерода варьирует от 10.6 до 17.2 т/га в органических горизонтах, в то время как в 30-сантиметровом минеральном слое изменяется от 46.6 до 122.2 т/га (Распоряжение..., 2017). Средний запас углерода подстилки колеблется от 0.6 до 28 т/га в сосновых лесах, от 0.9 до 58 т/га в еловых, от 1 до 29 т/га в широколиственных, от 0.3 до 27.4 т/га в березовых, от 0.7 до 19.9 т/га в осиновых и других мягколиственных (Честных и др., 2007). В Республике Коми, на северо-востоке европейской части России, запас углерода в метровом слое почвы варьировал от 29 т/га до 121 т/га в зависимости от типа почвы (Дымов, 2018). В Республике Карелия запасы почвенного углерода в метровом слое также существенно варьировали и составляли 24–434 т/га в сосновых лесах, 39–402.4 т/га в ельниках в зависимости от типа почвы и влажности (Бахмет, 2018).

В зоне хвойно-широколиственных лесов европейской части России средний запас углерода колеблется от 10.6 до 17.2 т/га в органических горизонтах, в то время как в 30-сантиметровом слое почв — от 46.6 до 122.2 т/га (Распоряжение..., 2017). В Московской области во вторичных постагрогенных липово-осиновых разнотравных лесах запас углерода в слое 0-30 см составляет 57 т/га (Телеснина и др., 2017), в слое 0–60 см составляет

88 т/га (Баева и др., 2017). В лесных биогеоценозах Среднего Поволжья в слое почвы 0–50 см запас углерода изменяется от 12.8 до 439.5 т/га в зависимости от типа леса, типа почвы и влажности (Демаков и др., 2018).

В органическом горизонте подстилки широколиственных лесов Центральной Европы низкий запас углерода обнаружен под буком (0.42 т/га) и в липовых лесах (0.20 т/га) (Langenbruch, 2012), в то время как в грабово-дубовых лесах он достигает 8.4 т/га (Bruckman and Campbell, 2016) и около 6 т/га в органическом горизонте еловых лесов Западного Причерноморья (Misir et al., 2012). В common garden экспериментах запасы углерода подстилки варьировали от 1.8 т/га в липовых, кленовых и ясеневых культурах до 3.8 т/га в дубовых и 4.5 т/га в березовых лесах. Под елью накапливалось до 14.5 т/га (Vesterdal et al., 2008).

Запасы углерода почвы в минеральном слое 0–20 см составляли 52 т/га в буковых лесах и 45 т/га в липовых лесах Центральной Европы (Langenbruch, 2012), в то время как в 0–50 см слое почвы грабово-дубовых лесов достигали 77 т/га (Bruckman and Campbell, 2016), а в пихтовых лесах западного Причерноморья — 155 т/га (Misir et al., 2012). В лесах common garden запасы углерода в слое 0–30 см варьировали от 61 т/га в еловых и березовых культурах до 64–67 т/га в кленовых и липовых и 69–71 т/га в дубовых и ясеневых лесах (Vesterdal et al., 2008).

Таким образом, показано, что лесные почвы умеренного пояса характеризуются значительным запасом углерода: до 100 Мг С/га или более. Однако вариабельность весьма высока как для органогенных, так и для минеральных горизонтов почв. Скорость связывания углерода в почве в этих лесах зависит от типа почвы, предшествующего запаса углерода, видового состава растительности и других природных и антропогенных факторов (Lal and Lorenz, 2012).

Работы по оценкам запасов углерода в разных элементах мозаики встречаются единично. При сравнении еловых парцелл установлены наименьшие запасы углерода в кисличной и мертвопокровной парцеллах, где

запасы в среднем составляют 13 т/га в верхнем минеральном слое 0–5 см по сравнению с черничной, зеленомошной и осоковой еловой парцеллой, где запасы составляют 17–18 т/га (Подвезенная, Рыжова, 2010). Показано увеличение запаса углерода подстилки в приствольных пространствах по сравнению с подкроновым и межкроновым пространством (Подвезенная, Рыжова, 2010). На примере сосновых лесов северо-западной Германии отмечена тенденция к увеличению запасов углерода подстилки от 35 ± 9 т/га в подкроновых пространствах до 38 ± 9 т/га в межкроновых (Penne et al., 2010).

ВЫВОДЫ

1. Растительность как основной источник поступления органического вещества в почву определяет уровень аккумуляции почвенного органического вещества. Выявлено три основных способа перевода углерода из пула растительности в пул почв: переработка надземного и подземного опада почвенной фауной и микробиотой, ассоциация органического вещества с почвенными агрегатами за счет корневого опада и корневых экссудатов, выщелачивание растворенного органического вещества из живых растений и лесной подстилки. При этом отсутствуют оценки вклада каждого из этих механизмов или их комбинированного влияния. Показано, что требуют внимания такие механизмы закрепления органического вещества почв, как физическая защита органического вещества в почвенных агрегатах и биохимическая устойчивость растительных соединений.

2. Динамика пулов почвенного углерода, обусловленная растительностью, связана с количеством и качеством опада как отдельных видов (идентичность вида), так и их совместным влиянием (разнообразие сообществ). Разнообразие растительности влияет на циклы углерода и азота через изменение биотических условий (качества и количества опада), с одной стороны, и через изменение физических условий среды (влажность, температура), с другой стороны. Значимо влияние всех аспектов разнообразия, как таксономического, так и функционального и структурного.

Существует ряд работ, показывающих влияние на аккумуляцию углерода возраста древостоя и структуры крон.

3. Ввиду тесной связи между разнообразием растительности и запасами углерода, возможно управление пулами почвенного углерода при введении климатически оптимизированного лесного хозяйства. Однако для этого 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, сравнение 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 почвенный пул углерода, практически отсутствуют оценки вклада различных факторов, действующих одновременно, в том числе связанных с растительностью, в регулирование запасов почвенного углерода.

4. Обнаружен недостаток оценок пулов углерода почв в подзоне хвойно-широколиственных лесов и факторов, обуславливающих запасы почвенного углерода в этих лесах.

ГЛАВА 2. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

2.1 ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектами исследования являются доминирующие типы равнинных и горных хвойно-широколиственных лесов европейской части России. Участки для исследований заложены в трехкратной повторности в доминирующих типах хвойно-широколиственных лесов в автоморфных позициях ландшафтов в 2016–2019 гг. Равнинные хвойно-широколиственные леса исследовали в Брянском Полесье и на Москворецко-Окской равнине, горные – на Северо-Западном Кавказе (рис. 2).

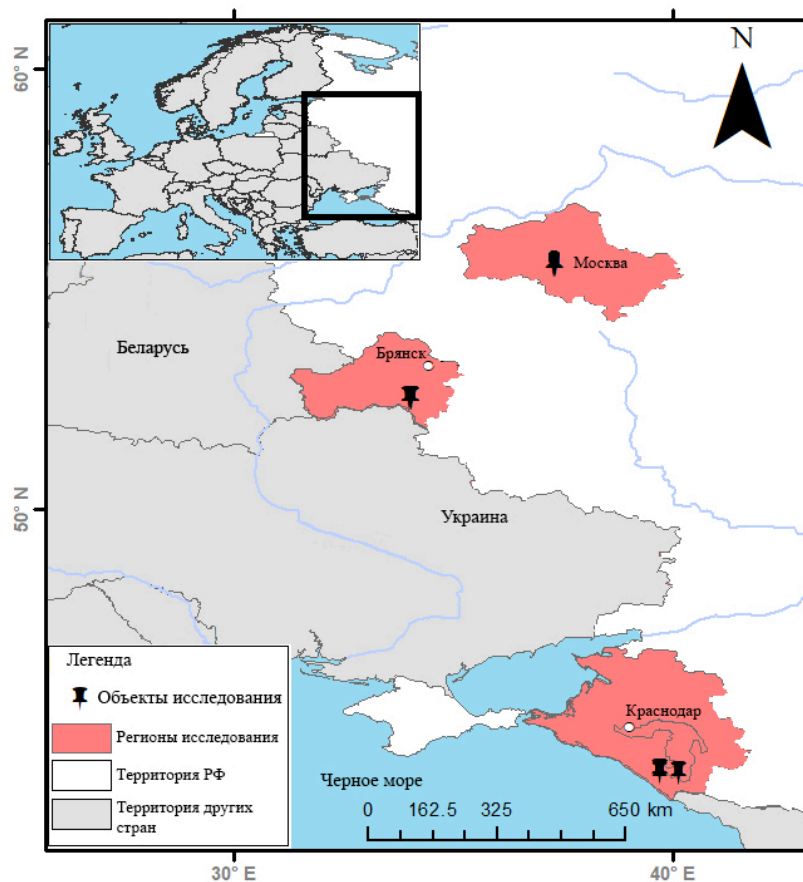


Рисунок 2. Схема расположения объектов исследования.

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) 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 мертвопокровные леса (СЗК3). В каждом типе леса заложено по 3 участка размером 0,25 га, всего 27 пробных площадей (таблица 1).

Таблица 1. Характеристика объектов исследования хвойно-широколиственных лесов

Рег ион *	Тип леса**	Координаты	Средн егодов ая темпе ратура , °С	Годовое количес тво осадков, мм	<0,002 мм (%) в составе ПП	Формула древостоя	Возра ст
МО	МО1	55°34'-55°35' N, 37°16'-37°20' E	4.6	675	22.5±1.4	8Лп2Б+О	70-90
	МО2					с+Д+Кл+ Е	
БП	БП1	52°32'-52°35' N, 34°00'-34°05' E	5.8	584	1.2±0.3	7Е2Д1Б+	40-60
	БП2					Ос+Лп+С	
	БП3					5С2Е2Б1 Д+Кл+Лп +Ос	70-120
СЗК	СЗК1	43°59'-44°03' N, 39°42'-40°08' E	10.2- 11.1	1080- 1145	25.5±3.4	3Д3Кл3Л п1Е+Вз+ Ос+Яс	более 120
	СЗК2					6Гр3Ос1Д +Б+Пх+Л п+Вш	
	СЗК3					25.3±4.5	5Гр2Пх2Б к1Ос+Д+ Яс+Б+К+ Лп+Вш
					17.9±1.6	8Б+2Пх+ Гр	>450

ПП – почвообразующие породы; *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 мертвопокровный лес

2.1.1 Климатические и ландшафтные характеристики объектов

Москворецко-Окская равнина (55°34'-55°35' N, 37°16'-37°20' E).

Исследования проводили на Москворецко-Окской равнине в пределах Валуевского лесопарка, который был организован в 1935 году, как часть Лесопаркового защитного пояса Москвы. В ландшафтной структуре территории доминируют местности моренных равнин с абсолютными высотами 190–210 м (Ландшафты ..., 1997). Среднегодовая температура составляет 4.6 °С, годовое количество осадков – 675 мм (worldclim.org/).

Брянское Полесье (52°32'-52°35' N, 34°00'-34°05' E). Исследования проводили в юго-восточной части Брянского Полесья в заповеднике «Брянский лес» на вершинах грив зандровых местностей. Зандровые песчаные местности представляют собой песчаные волнисто-западинные приводораздельные равнины с абсолютными высотами 155-175 м. Относительные превышения рельефа обычно составляют 1-3 м, реже встречаются гривы с превышением до 5 м. Для этих территорий характерен мозаично-пятнистый рисунок ландшафта, обусловленный обилием западин и котловин. Среднегодовое количество осадков составляет 584 мм. Среднегодовая температура 5.8°С (worldclim.org).

Северо-Западный Кавказ (43°59'-44°03' N, 39°42'-40°08' E).

Исследования проводились в верховьях р. Пшехи (Краснодарский край, Апшеронское лесничество) и р. Белой (Республика Адыгея, Кавказский биосферный заповедник). Данная территория относится к Западной горной провинции Большого Кавказа (Гвоздецкий, 1963; Мильков, Гвоздецкий, 1986). Высота над уровнем моря – 650-700 м. Среднегодовое количество осадков составляет 1080-1145 мм. Среднегодовая температура – 10.2-11.1°С (worldclim.org).

2.1.2 Характеристика растительности

Москворецко-Окская равнина (МО). Лесной покров представлен широколиственными (с доминированием липы) и широколиственно-еловыми лесами. На значительной площади развиты вторичные послерубочные

сообщества с большим участием мелколиственных видов деревьев (Мучник и др., 2020). В качестве объекта исследования изучены следующие сообщества: березово-липовые с осиной неморальнотравные леса (березово-липовые волосистоосоковые леса), липовые леса с березой и осиной неморальнотравные (липовые волосистоосоковые леса) и широколиственно-еловые бореально-неморальнотравные леса (широколиственно-еловые кислично-разнотравные леса). При анализе данных березово-липовые с осиной неморальнотравные леса, липовые леса с березой и осиной неморальнотравные леса объединены в один тип леса – березово-липовые с осиной неморальнотравные леса, т.к. были сходны по флористическому, зоологическому составу и почвенным условиям. По эколого-флористической классификации широколиственно-еловые кислично-разнотравные леса относятся к ассоциации *Rhodobryo rosei–Piceetum abietis* Korotkov 1986; а березово-липовые с осиной неморальнотравные леса – к ассоциации *Mercurialo perennis-Quercetum roboris* Bulokhov et Solomesch 2003 союза *Quercu-Tilion* Solomesč et Laivinsh ex Bulokhov et Solomesč 2003 (Морозова, Тихонова, 2012; Морозова и др., 2017).

Березово-липовые леса с осиной неморальнотравные (МО1, рис.3) (березово-липовые волосистоосоковые леса). Возраст деревьев 70–100 (110) лет. Происходит выпадение из состава древостоя раннесукцессионных видов деревьев (*Betula pendula* и *Populus tremula*), преобладание переходит к липе, которая формирует 2-х ярусный древостой. При отсутствии поблизости генеративных особей ели данный тип сообщества может существовать достаточно долго, представляя диапорический субклимакс (Аккумуляция..., 2018).

В кустарниковом ярусе доминирует лещина обыкновенная, постоянно встречаются жимолость обыкновенная и подрост клена остролистного. В травяном ярусе доминирует осока волосистая. Высокое постоянство имеют зеленчук желтый, пролесник многолетний (*Mercurialis perennis*), лютик кашубский (*Ranunculus cassubicus*) и др. Моховой ярус развит слабо, его

проективное покрытие не превышает 1-2%. Мхи преимущественно встречаются на оголенной почве и разлагающемся мелком древесном дебрисе (Аккумуляция..., 2018). В лесах МО1 выделено три доминирующих элемента мозаики – березовый неморальнотравный, липовый неморальнотравный (Тихонова, Тихонов, 2021), окна с неморальными травами, образованные вывалами старых деревьев.



Рисунок 3. Пробные площади в лесах МО1: березово-липовых с осинкой неморальнотравных (березо-липовые волосистоосоковые леса). Автор фото: Тихонова Е.В.

Широколиственно-еловые бореально-неморальнотравные леса (МО2, рис.4) (широколиственно-еловые кислично-разнотравные леса). Возраст

сообществ более 100 лет, максимальный возраст ели 115–125 лет. Древесный ярус сомкнутый, но с неравномерной горизонтальной структурой, характерно наличие небольших окон на месте вывалов отдельных деревьев. Ярус отчетливо подразделяется на два подъяруса. В верхнем подъярусе доминирует *Picea abies*, есть небольшая примесь *Quercus robur*, часто сохраняются старые деревья *Populus tremula* и *Betula pendula*. В подчиненном подъярусе доминирует *Picea abies*, встречается *Tilia cordata*.



Рисунок 4. Пробные площади в лесах МО2: широколиственно-еловых бореально-неморальнотравных (широколиственно-еловые кислично-разнотравные леса). Автор фото: Кузнецова А.И.

Подлесок и подрост хорошо развиты: доминирует лещина обыкновенная, постоянно встречаются жимолость обыкновенная, крушина ломкая (*Frangula alnus*), рябина обыкновенная, ель европейская и липа сердцевидная. Покрытие травяного яруса неравномерное, доминирует кислица обыкновенная (*Oxalis acetosella*), встречаются живучка ползучая (*Ajuga reptans*), копытень европейский (*Asarum europaeum*), ландыш майский

(*Convallaria majalis*), лютик кашубский и др. Моховой ярус лучше развит, чем в лесах МО1, его покрытие – от 2 до 15%, видовой состав отличается большим разнообразием (Аккумуляция..., 2018). В лесах МО2 выделено три доминирующих элемента мозаики – дубовый бореально-неморальнотравный, еловый бореально-неморальнотравный (Тихонова, Тихонов, 2021), окна с бореальными и неморальными травами, образованные вывалами старых деревьев.

Брянское Полесье (БП). На территории задровых местностей заповедника «Брянский лес» доминируют сосняки. Они сформировались в результате посадок на месте вырубок в неморальных лесах (Евстигнеев, 2009). Гетерогенность экотопических условий, создаваемых волнисто-западинным рельефом, дифференцирует эти сообщества на несколько ассоциаций (Евстигнеев, 2010). На вершинах грив сосняки представлены следующими ассоциациями: *Cladonio-Pinetum sylvestris* Juraszek 1927, *Dicrano-Pinetum sylvestris* Preising et Knapp ex Oberdorfer 1957, *Vaccinio myrtilli-Quercetum roboris* Bulokhov et Solomeshch 2003. Смешанные леса с сосной, елью, дубом и др. неморально-бореальнотравные принадлежат ассоциации *Vaccinio myrtilli-Quercetum roboris* Bulokhov et Solomeshch 2003, а хвойно-широколиственные леса, которые сохранились на очень маленьких площадях – *Mercurialo perennis-Quercetum roboris* Bulokhov et Solomeshch 2003.

Сосняки кустарничково-зеленомошные бореальнотравные (БП1, рис.5) (сосняки кустарничково-зеленомошные) представляют собой культуры возрастом 40-60 лет. В древостое доминирует сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris*), реже встречается береза пушистая (*Betula pubescens*), единично отмечены особи дуба черешчатого (*Quercus robur*). Подрост формируют ель европейская (*Picea abies*), дуб черешчатый, береза пушистая и др. Из кустарников встречаются крушина ломкая (*Frangula alnus*) и ракитник русский (*Chamaecytisus ruthenicus*). В травяном покрове преобладают бореальные виды: черника обыкновенная (*Vaccinium myrtillus*), брусника

обыкновенная (*Vaccinium vitis-idaea*), вереск обыкновенный (*Calluna vulgaris*). Покрытие зеленых мхов достигает 90% (Аккумуляция..., 2018). В сосняках кустарничково-зеленомошных выделен один доминирующий элемент мозаики – сосна с кустарничками и бореальными травами.



Рисунок 5. Пробные площади в лесах БП1: сосняки кустарничково-зеленомошные бореальнотравные (сосняки кустарничково-зеленомошные). Автор фото: Кузнецова А.И.

Смешанные леса с сосной, елью, дубом и др. неморально-бореальнотравные (БП2, рис.6) (сосняки сложные волосистоосоково-разнотравные) представляют собой культуры возрастом 70-120 лет. Сосна встречается в древостое, но некоторые деревья выпадают. В ярусе деревьев высоко участие ели европейской, дуба черешчатого, березы пушистой, липы сердцевидной (*Tilia cordata*), реже встречаются клен остролистный (*Acer platanoides*) и осина обыкновенная (*Populus tremula*).



Рисунок 6. Пробные площади в лесах БП2: смешанные леса с сосной, елью, дубом и др. неморально-бореально-таежные (сосняки сложные волосистоосоково-разнотравные). Автор фото: Кузнецова А.И.

В подросте преобладает липа сердцевидная, меньше участие клена остролистного, ели европейской, дуба черешчатого, единично встречаются осина обыкновенная и вяз голый (*Ulmus glabra*). В синузии кустарников отмечены крушина ломкая и лещина обыкновенная (*Corylus avellana*). В травяном ярусе доминируют неморальные виды: осока пальчатая (*Carex digitata*), осока волосистая (*Carex pilosa*), ландыш майский (*Convallaria majalis*), яснотка пятнистая (*Lamium maculatum*), звездчатка жестколистная (*Stellaria holostea*). Высоко участие и бореальных растений: описка волосистая (*Luzula pilosa*), майник двулистный (*Maianthemum bifolium*), золотарник обыкновенный (*Solidago virgaurea*) и др. В связи с увеличением сомкнутости верхних ярусов покрытие напочвенных мохообразных

уменьшается до 1-15% (Аккумуляция..., 2018). В сосняках сложных также выделен один доминирующий элемент мозаики – сосна с неморальными и бореальными травами.

Широколиственные леса с елью неморальнотравные (БПЗ, рис.7) (полидоминантные широколиственные с елью зеленчуково-волосистоосоковые леса) формируются на вершинах грив задровых местностей при отсутствии антропогенных воздействий на протяжении длительного времени. Возраст этих сообществ более 120 лет. Древесный ярус полидоминантный. В нем содоминируют дуб черешчатый, ель обыкновенная, клен остролистный, липа сердцевидная, ясень обыкновенный (*Fraxinus excelsior*) и вяз голый. Полностью выпадает из древостоя раннесукцессионный вид – сосна обыкновенная. В подросте преобладают липа сердцевидная, клен остролистный, вяз голый, реже отмечены ясень обыкновенный, ель европейская и др. Среди кустарников чаще встречаются лещина обыкновенная и черемуха обыкновенная (*Padus avium*). В травяном ярусе доминируют виды неморальной группы: сныть обыкновенная (*Aegopodium podagraria*), осока волосистая, пролесник многолетний (*Mercurialis perennis*), звездчатка жестколистная и др. Напочвенные мохообразные из-за нехватки светового довольствия не встречаются (Аккумуляция..., 2018). 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.



Рисунок 7. Пробные площади в лесах БПЗ: широколиственные леса с елью неморальнотравные (полидоминантные широколиственные с елью зеленчуково-волосистоосоковые леса). Автор фото: Никитина А.И.

Северо-Западный Кавказ (СЗК). На значительной площади развиты вторичные послерубочные сообщества с большим участием мелколиственных видов деревьев (граба, осины и др.). При отсутствии антропогенных воздействий на протяжении длительного времени бук и пихта активно участвуют в формировании старовозрастных малонарушенных лесов (Аккумуляция..., 2018).

По эколого-флористической классификации эти леса относятся к разным вариантам субассоциации *Illici colchicae-Abietetum nordmannianaе* *Rhododendretosum pontici* Korotkov et Belonovskaja 1987 ассоциации *Illici colchicae-Abietetum nordmannianaе* Korotkov et Belonovskaja 1987 подсоюза *Abieti-Fagenion orientalis* Korotkov et Belonovskaja 1987 союза *Vaccinio-*

Fagion orientalis (Zohary 1973) Passarge 1981 порядка *Rhododendro pontici-Fagetalia orientalis* (Soo 1964) Pass. 1981 класса *Quercu-Fagetea* Br.-Bl. et Vlieger 1937. Диагностические виды субассоциации – *Rhododendron ponticum*, *Carpinus betulus*, *Hedera colchica*, *Acer laetum*, *Quercus iberica*, *Impatiens noli-tangere* и др. (Биота..., 1990).

Осиново-грабовые жимолостно-мелкотравные леса (СЗК1, рис.8) (грабовники свежие) появились на территории сплошной вырубki начала 50-х годов прошлого столетия. Возраст этих сообществ 45-65 лет. В древостое доминирует граб обыкновенный (*Carpinus betulus*), широко распространена осина (*Populus tremula*).



Рисунок 8. Пробные площади в лесах СЗК1: осиново-грабовые жимолостно-мелкотравные леса (грабовники свежие). Автор фото: Никитин Д.А.

Ярус подроста и подлеска (В) развит слабо. В ярусе преобладает подрост пихты Нордманна (*Abies nordmanniana*), бука восточного (*Fagus orientalis*) и граба. Единично встречается подрост деревьев осины, дуба скального (*Quercus petraea*), среди кустарников: лещина (*Corylus avellana*), крушина (*Frangula alnus*), рододендрон желтый (*Rhododendron luteum*),

калина (*Viburnum opulus*) и др. Травяной ярус представлен мелкотравьем с доминированием жимолости каприфоль (*Lonicera caprifolium*). Моховой ярус (D) распространен спорадически на пристволовых повышениях и валеже, редко – почвенные бугры. Проективное покрытие яруса 5-7(10)% (Аккумуляция..., 2018).

Буково-пихтово-грабовый мелкотравный лес (СЗК2, рис.9) (грабовники с пихтой свежие). Возраст этих сообществ 80–110 лет. В ярусе деревьев в верхнем подъярусе высоко участие бука и пихты. Нижний подъярус формируют раннесукцессионные виды деревьев – граб, осина, дуб скальный и береза пушистая (*Betula pubescens*).



Рисунок 9. Пробные площади в лесах СЗК2: буково-пихтово-грабовый мелкотравный лес (грабовники с пихтой свежие). Автор фото: Гераськина А.П.

В ярусе подроста и подлеска преобладает подрост пихты, реже бука. Единично встречается подрост клена (*Acer platanoides*), граба, боярышника

однопестичного (*Crataegus monogyna*), дуба скального, липы (*Tilia begoniifolia*), каштана посевного (*Castanea sativa*). В напочвенном покрове преобладает неморальное мелкотравье и кустарники. Характерные виды яруса: кочедыжник женский (*Athyrium filix-femina*), осока лесная (*Carex sylvatica*), цикламен колхидский (*Cyclamen colchicum*), волчегодник понтийский (*Daphne pontica*), жимолость, толстостенка крупнолистная (*Pachyphragma macrophyllum*), купена восточная (*Polygonatum orientale*), адамов корень (*Tamus communis*), фиалка душистая (*Viola odorata*). Моховой ярус (D) локализован на пристволовых повышениях и валеже, редко на почве. Проективное покрытие яруса 5-15% (Аккумуляция..., 2018).

Старовозрастные пихтово-буковые метвопокровные леса (СЗКЗ, рис.10) (бучина с пихтой свежая). Эти леса характеризуются отсутствием следов рубок и пожара (отсутствуют угли в почве), древесный ярус имеет сложную пространственную структуру, представленную разновозрастными деревьями. Возраст отдельных деревьев пихты превышает 450 лет. В древостое содоминируют только бук и пихта.

Ярус подлеска и подроста (B) развит слабо с доминированием подроста пихты, иногда бука. Среди кустарников очень редко встречаются смородина кавказская (*Ribes biebersteinii*), падуб колхидский (*Ilex colchica*) и рододендрон понтийский (*Rhododendron ponticum*). Травяно-кустарничковый ярус мертвопокровный. Моховой ярус (D) локализован на пристволовых повышениях, стволах деревьев, валеже и почве. Проективное покрытие 5-10(12)% (Аккумуляция..., 2018).



Рисунок 10. Пробные площади в лесах СЗКЗ: старовозрастный пихтово-буковый метвопокровный лес (бучина с пихтой свежая). Автор фото: Гераськина А.П.

2.1.3 Характеристика почв

Москворецко-Окская равнина (МО). В почвенном покрове преобладают дерново-подзолистые (Классификация..., 2004) почвы (Albic Retisols, по WRB, 2015) на покровном суглинке (рис.11). Почвообразующая порода характеризуется средне-тяжелосуглинистым гранулометрическим составом: содержание физической глины в почвообразующих породах варьирует от 34.3% до 45.3%. Актуальная кислотность почвообразующих пород составляет 5.1 рН. По валовому составу почвообразующие породы всех типов леса сопоставимы (Приложение 2, Таблица П1).



А



Б

Рисунок 11. Почвы (А) березово-липовых волосистоосоковых лесов и (Б) широколиственно-еловых кислично-разнотравных лесов. Автор фото: Кузнецова А.И.

Брянское Полесье (БП). В почвенном покрове всех стадий сукцессии/типов леса преобладают дерново-подзолы иллювиально-железистые (Классификация..., 2004) (Albic Umbric Podzols по WRB, 2015) на флювиогляциальных отложениях (рис.12). Объекты исследований в Брянском Полесье различаются по некоторым характеристикам экотопа. Почвообразующая порода на всех объектах характеризуется песчаным гранулометрическим составом: содержание физической глины в почвообразующих породах в сосняках и полидоминантных широколиственных лесах варьирует от 0.5% до 2%, в то время как в смешанном лесу с дубом, сосной и елью – от 1.5 до 5%. Результаты валового химического анализа демонстрируют обогащение почвообразующих пород смешанных лесов такими элементами, как К, Са, Al и Fe, при относительно высоком содержании в них физической глины. Также почвы широколиственных лесов с елью отличаются мощным элювиальным горизонтом. Развитие этого глубоководного горизонта может быть результатом периодических колебаний уровня грунтовых вод. По

наблюдениям сотрудников заповедника «Брянский лес» с 2010 года уровень грунтовых вод значительно снизился.



А

Б

В

Рисунок 12. Почвы (А) сосняков кустарничково-зеленомошных, (Б) сосняков сложных и (В) полидоминантных широколиственных лесов с елью. Автор фото: Кузнецова А.И.

Северо-Западный Кавказ (СЗК). В почвенном покрове преобладают буроземы (Классификация..., 2004), разной степени выраженности глеевого процесса (Dystric Cambisols, по WRB, 2015) на элювии глинистых сланцев (рис.13).



А

Б

В

Рисунок 13. Почвы (А) осиново-грабовых жимолостно-мелкотравных лесов, (Б) буково-пихтово-грабовых мелкотравных лесов и (В) пихтово-буковых мертвопокровных лесов. Автор фото: Кузнецова А.И.

Наблюдаемое оглеение типично для почв описываемого района и определяется избыточным поверхностным увлажнением (Зонн, 1950). Признаки оглеения выражены более ярко в старовозрастных лесах с преобладанием бука, отличающегося низкой интенсивностью транспирации (Gebauer, 2010). Почвообразующая порода характеризуется тяжелосуглинистым гранулометрическим составом: содержание физической глины в почвообразующих породах варьирует от 36.5% до 72.7%. Актуальная кислотность почвообразующих пород изменяется от 5.5 до 5.7 рН. По валовому составу почвообразующие породы всех трех стадий сопоставимы. Щебнистость почв не выражена, так же как на объектах исследований других ученых в сходных условиях (Зонн, 1950).

Морфологическое описание почвенных разрезов приведено в Приложении 1.

2.2. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.2.1 Исследования растительности

Геоботанические описания лесных сообществ выполнены геоботаниками в рамках комплексных исследований по проектам РФФИ и РНФ на площадках 20 × 20 м в пределах каждой постоянной пробной площади. В каждом регионе выполнено от 11 до 14 геоботанических описаний для каждого типа леса, всего выполнено 100 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: Миркин и др., 1989) и даны латинские названия сосудистых растений (Маевский, 2014). Классификация исследуемых лесов проводилась при помощи электронного определителя типов леса Европейской России, который разработан Л.Б. Заугольной и В.Б. Мартыненко (sepl.rssi.ru/bio/forest/index.htm).

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 как монодоминантные (лиственные и хвойные), так и смешанные полидоминантные леса. В качестве индикаторов разнообразия растений использовали параметры видового 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). Данные индикаторы предложены исходя из предположения, что чем больше видов с разным качеством опада, тем выше функциональное разнообразие растений. 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 углерод в биомассе ствола по уравнению в соответствии с официально принятыми национальными рекомендациями (Распоряжение..., 2017):

$$\sum CP_i = V_i \times KP_i,$$

где CP_i углерод в стволовой биомассе i -й породы деревьев, т С/га; V_i объем стволовой древесины, м³/га; KP_i конверсионные коэффициенты для i -й породы дерева.

2.2.2 Исследования почв

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 (рис.

14). 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.

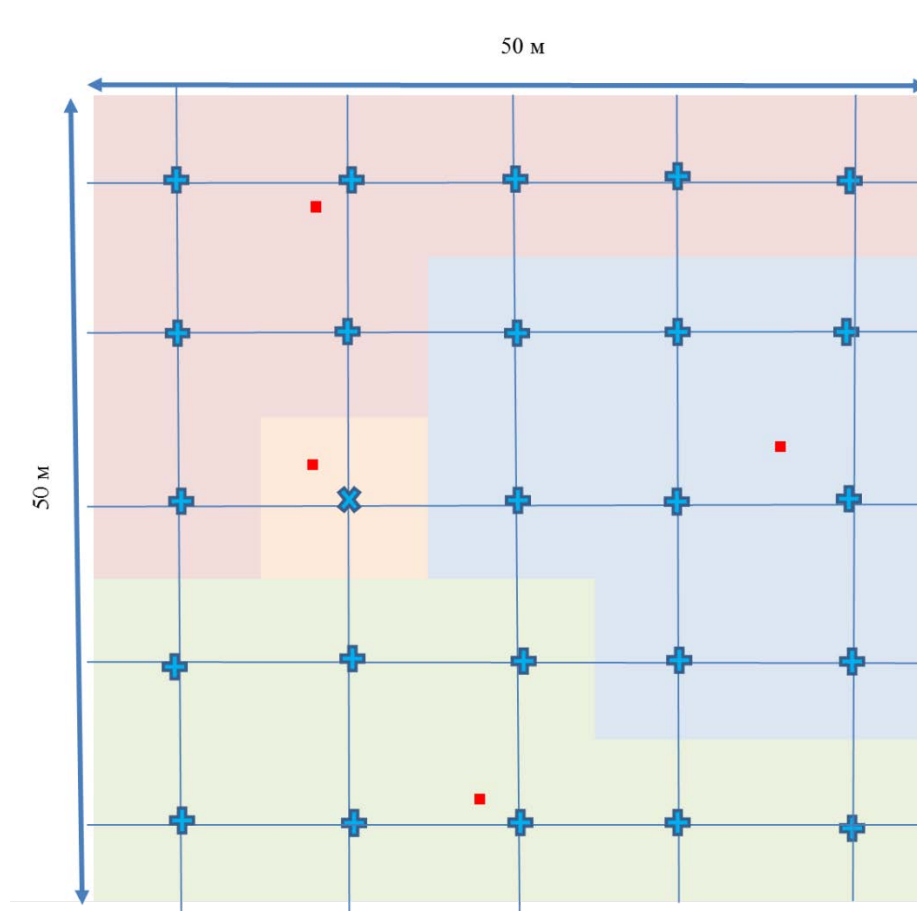


Рисунок 14. Схема отбора почвенных образцов. ■ - место отбора подстилки 25×25 см; X - почвенный разрез для отбора проб на определение плотности мин. горизонтов и концентрации С; + - место отбора почвенных проб буром; Цветом обозначены схема смешивания индивидуальных проб.

В лаборатории почвенные образцы были высушены и просеяны через сито 2 мм. Оценка содержания углерода и азота проводилась на CHN анализаторе (EA 1110 (CHNS-O)). Для определения качества опада в подгоризонте опада L подстилки определяли актуальную кислотность (pH) 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 1М $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ (pH=4.65) (Halonen, 1983; Methods..., 1989). Содержание металлов определяли методом атомно-абсорбционной спектроскопии (AAAnalyst 800 spectrometer). Степень насыщенности основаниями (СН) рассчитывалась как отношение суммы оснований Ca, K, Mg, Na к сумме 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 отбирали образцы с использованием рамки 0.25×0.25 м (рис.15), для определения плотности в опорных разрезах каждые 10 см отбирали образцы с использованием бьюкса объемом 100 см^3 .



А



Б

Рисунок 15. Отбор проб для определения запасов подстилки (А) березово-липовых лесов Москворецко-Окской равнины, (Б) сосняков сложных Брянского Полесья. Автор фото: Кузнецова А.И.

В лаборатории все образцы сушили при $105 \text{ }^\circ\text{C}$ и взвешивали. Запасы углерода в органическом горизонте рассчитывали путем умножения веса пробы на содержание углерода. Запасы углерода в минеральных профилях почвы рассчитывались путем умножения объемной плотности, содержания углерода и толщины минерального слоя (Распоряжение..., 2017):

$$C_{st}=C \times H \times BD,$$

где BD – плотность, $г/см^3$; C – содержание углерода, $г/кг$; H – мощность, $см$.

Описательная статистика переменных размещена в приложении к работе (Приложение 2, таблица П2-П5).

2.2.3 Исследования почвенных вод и атмосферных осадков

Для характеристики объемов поступления углерода с атмосферными осадками, внутриводной миграции и выноса с почвенными водами на объектах МО и БП установлены 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).

В каждом типе леса МО установлены осадкоприемники для дождя и гравитационные лизиметры под двумя почвенными горизонтами (LFH и BT) в доминирующих подкромовых элементах мозаики и окнах (рис.16). В широколиственно-еловых лесах оборудование установлено под кронами дуба и ели, в березово-липовых лесах – под кронами липы и березы.



А



Б

Рисунок 16. Коллекторы по улавливанию атмосферных выпадений и почвенных вод в (А) березово-липовых лесах и (Б) широколиственно-еловых лесах Москворецко-Окской равнины. Автор фото: Тихонова Е.В.

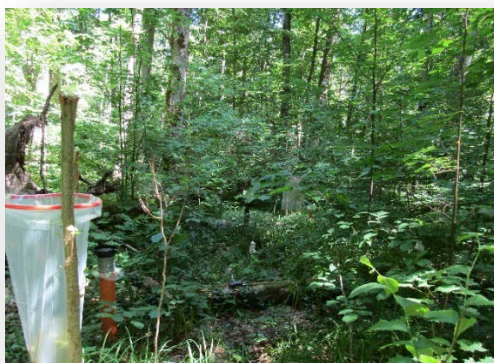
В каждом типе леса БП установлены осадкоприемники для дождя и снега и гравитационные лизиметры под двумя почвенными горизонтами в доминирующих подкроновых элементах мозаики: LFH и E – для полидоминантных широколиственных лесов с елью LFH и BF – для сосновых лесов. В полидоминантном широколиственном лесу оборудование установлено под кронами дуба, ели, клена, в сосновых лесах – под кронами сосны. Поскольку в широколиственном лесу выделены окна как элемент мозаики, в них дополнительно устанавливались по 2 осадкоприемника и по 1 гравитационному лизиметру под двумя почвенными горизонтами: LFH и E (рис.17).



А



Б



В

Рисунок 17. Коллекторы по улавливанию атмосферных выпадений и почвенных вод в (А) сосняках кустарничково-зеленомошных, (Б) сосняках сложных и (В) полидоминантных широколиственных лесах с елью Брянского Полесья. Автор фото: Кузнецова А.И.

Для оценки поступления углерода со снеговыми выпадениями, проникающими под древесный полог, на объекте БП заложено 15 снегоприемников (рис.18). Основные характеристики снегоприемников: диаметр пластикового кольца 30 см; высота конструкции 150 см; приемники атмосферных выпадений: полиэтиленовый пакет вместимостью до 50 л. Снегоприемники улавливают все осадки в зимний период с конца октября по апрель. Для анализа объемов снега на объекте МО использованы данные по количеству зимних осадков, получаемые на ближайшей метеостанции в пос. Внуково, которая располагалась в непосредственной близости к объекту исследования.

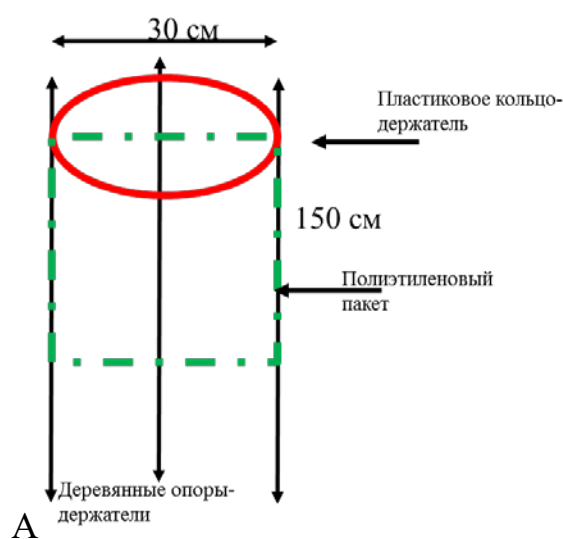


Рисунок 18. Схема устройства снегоприемника (А) и фото снегоприемника в полидоминантном широколиственном лесу с елью на территории Брянского Полесья (Б) в летний сезон.

Для оценки поступления углерода с дождевыми выпадениями на объекте БП заложено 20 осадкоприемников; на объекте МО заложено 26 осадкоприемников (рис.19). Основные характеристики осадкоприемников: диаметр воронки –15 см; высота пластиковой трубы – 100 см; приемники атмосферных вод – полиэтиленовые пакеты вместимостью до 3 литров.

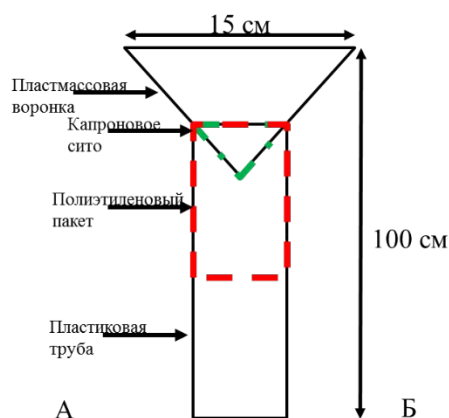


Рисунок 19. Схема устройства осадкоприемника (А) и фото ежемесячной замены полиэтиленового пакета в осадкоприемнике на объектах Москворецко-Окской равнины (Б) в летний сезон.

Для оценки выноса углерода с почвенными водами на объекте БП заложено 20 гравитационных почвенных лизиметра конструкции Джона Дерома; на объекте МО – 30 почвенных лизиметра (рис.20). 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 (Рассеянные..., 2004).

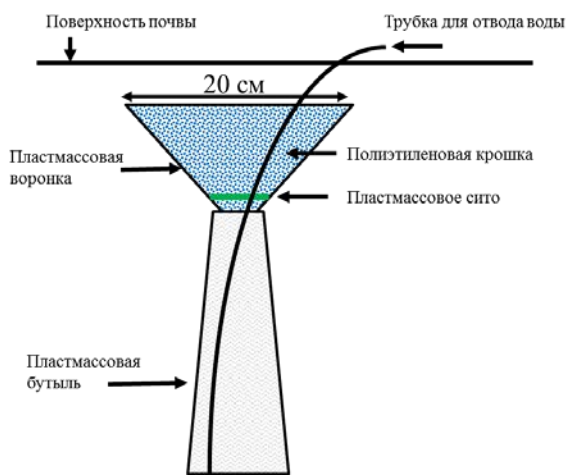


Рисунок 20. Схема устройства почвенного лизиметра (А) и фото закладки лизиметра в широколиственно-еловом лесу Москворецко-Окской равнины.

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 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, Часть XIV (Clarke et al., 2010). На объекте БП 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. На объекте МО анализировали данные за двухлетний период: (1) с мая 2019 г. по май 2020 г., (2) с мая 2020 г. по май 2021 г. Все пробы после размораживания фильтровали через мембранный фильтр M-Millipore с диаметром пор 0.45 мкм, что позволило учесть РОУ. Содержание РОУ определяли методом термokatалитического окисления с бездисперсионной ИК-регистрацией на анализаторе общего углерода/азота ТОС-V_{CPH}.

Потоки элементов (поступление с атмосферными выпадениями, поглощение и вынос углерода) определяли на основе разности массы элемента (Гашкина и др., 2020). 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 в нижних минеральных горизонтах – разницу масс элементов в лизиметрических водах, прошедших подстилку, гумусовый горизонт почв и прошедших нижний минеральный горизонт (E/BF) соответственно. 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.

2.2.4 Статистические методы

Статистическую обработку проводили с использованием статистической программы R (R Core Team, 2020).

Однофакторный дисперсионный анализ (ANOVA) проведен для оценки вклада регионов и типов леса в вариацию, с одной стороны, основных факторов, влияющих на запас углерода в почве (почвообразующие породы, растительность, качество подстилки), с другой стороны, непосредственно запасов углерода.

V-тест (Husson et al., 2017) использован для оценки влияния региона и типа леса на величину как 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 в вариацию запасов углерода в подстилке и минеральной толще почв проведен анализ с использованием иерархического разложения (Chevan and Sutherland, 1991). Анализ выполнен с помощью пакета hier.part (Mac Nally and Walch, 2004). Данный метод основан на разложении R^2 согласно иерархии всех возможных линейных моделей, которые можно построить с данным набором

предикторов. Подробное описание метода изложено в работе (Лукина и др., 2021).

В качестве отклика выбран запас углерода в подстилке и минеральных слоях почв. В качестве предикторов оценивали долю частиц меньше 0.002 мм в почвообразующих породах как характеристику гранулометрического состава, индикаторы функционального разнообразия растений (ярусы А, В и С), позволяющие учитывать, как количество (проективное покрытие, запасы стволовой древесины), так и качество опада (видовая насыщенность как показатель биоразнообразия), а также содержание азота, отношение C/N, кислотность, степень насыщенности основаниями, содержание Ca, K, Mg горизонта L подстилки как индикаторы качества опада.

Объем выборки для статистической обработки данных размещен в приложении к работе (Приложение 2, таблица Пб).

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. Оценка вклада этих факторов в варьирование запасов углерода в лесных почвах является важнейшей задачей. При оценках запасов углерода в лесных почвах России показано влияние абиотических факторов (климата, рельефа, почвообразующих пород) (Честных и др., 2004, 2007; Щепашенко и др., 2013; Чернова и др., 2021, Мажитова и др., 2003; Машика, 2005; Бобкова и др., 2014; Бахмет, 2018; Дымов, 2018; Честных и др., 2020; Чернова и др., 2020; Рыжова и др., 2020). Для таежных лесов обнаружено влияние древесной растительности и напочвенного покрова на запасы углерода в почвах (Lukina et al, 2020). При оценках запасов почвенного углерода в подзоне хвойно-широколиственных лесов европейской части России обнаружено влияние таких факторов, как история природопользования и рельеф (Баева и др., 2017; Телеснина и др., 2017; Демаков и др., 2018). Актуальной задачей является оценка вклада растительности наряду с оценкой влияния других факторов на запасы почвенного углерода в хвойно-широколиственных лесах разных типов.

3.1 ОЦЕНКА ВКЛАДА РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ В ВАРЬИРОВАНИЕ ЗАПАСОВ УГЛЕРОДА В ПОЧВАХ ХВОЙНО-ШИРОКОЛИСТВЕННЫХ ЛЕСОВ

Результаты однофакторного дисперсионного анализа продемонстрировали значительный вклад таких факторов, как регион и тип леса, в изменение запасов углерода в органических и минеральных слоях почвы (таблица 2). Фактор «регион» обеспечил 37% вариации запасов

углерода в слое FH подстилки 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) (таблица 3) и в почвах в целом. Самым низким запасом углерода в почвах характеризовались леса Брянского Полесья (39 и 8 т/га в слое 0–30 и 30–50 см, соответственно), формирующиеся хотя и в благоприятных климатических условиях, но на песчаных почвообразующих породах. Леса Москворецко-Окской равнины, формирующиеся на суглинках, аккумулируют в почвах больше углерода (68 и 15 т/га в слое 0–30 и 30–50 см, соответственно), чем леса Брянского Полесья, но меньше, чем леса Северо-Западного Кавказа.

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

Фактор	Слой, см					
	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
Типы леса СЗК	0.07	0.025	0.44	<0.001	0.29	0.004
Типы леса МО	0.26	0.011	0.24	<0.001	0.05	0.127
Типы леса БП	0.48	<0.001	0.24	<0.001	0.07	0.298

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

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. 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.

На региональном уровне подчеркивается ведущая роль климатических условий в варьировании запасов почвенного углерода (Wiesmeier et al., 2019). Запасы углерода в почве положительно коррелируют со средней годовой температурой, годовым количеством осадков и, следовательно, с чистой первичной продуктивностью (Amundson, 2001).

Влияние климатических факторов на запас углерода почвы опосредовано растительностью, ее видовым составом и продуктивностью. Более высокие температуры (на 5°C) и большее количество осадков (на 500 мм) в районе исследований на Северо-Западном Кавказе по сравнению с районами в Брянском Полесье и Москворецко-Окской равнины объясняют выраженные различия в составе растительности. Эти различия между лесами СЗК, БП и МО обусловлены разной биологией доминирующих деревьев и продолжительностью вегетационного периода, что приводит к различиям в первичной продуктивности. Более продуктивные сообщества производят больше опада. По имеющимся данным, годовое количество опада в лесах МО колеблется от 2.5 до 4.4 т/га (Карпачевский, 1977), в лесах БП - от 3.1 до 4.4 т/га (Шаблий, 1990), в лесах СЗК - от 3 до 12.2 т/га (Зонн, 1950). Запасы стволовой древесины увеличились от 156 т/га в лесах МО до 300 т/га в лесах СЗК. Самые высокие запасы стволовой древесины, а также самые высокие запасы углерода в почве характерны для лесов СЗК, произрастающих в более благоприятных климатических условиях. Таким образом, подтверждено влияние климатических условий на запасы углерода в минеральных горизонтах почв.

Результаты однофакторного дисперсионного анализа показали, что более 80% вариации содержания глинистой фракции (<2 μm) в пробах из почвообразующих пород объясняется принадлежностью участков к регионам

(таблица 4). Наименьшее содержание глинистой фракции обнаружено в лесах БП (1.6%), а максимальное - в лесах СЗК (23.1%) (таблица 3). Содержание глинистой фракции колебалось от 15.9% до 31.3% во всех типах лесов СЗК (таблица 5), от 17.8% до 27.8% в лесах МО (таблица 6) и от 0.5 до 2.6% в лесах БП (таблица 7).

По сравнению с лесами СЗК и МО, развивающимися на почвообразующих породах с высоким содержанием тонких частиц, запасы углерода в минеральных слоях почвы в лесах БП, сформированных на песчаных породах, значительно ниже (таблица 3). Воздействие тонких частиц на запасы углерода можно объяснить образованием органо-минеральных комплексов с разной степенью устойчивости (Fujisaki et al., 2018), что связано с качественным составом глинистых фракций и их абсорбционной способностью (Balabane and Balabane, 2004; Lützow et al., 2006). Однако стоит отметить, что в изменчивости запасов углерода почвы большое значение имеют и другие факторы, в первую очередь, биотические и антропогенные.

Существенный вклад в варьирование запасов почвенного углерода вносит тип леса.

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) (таблица 5). 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) (таблица 5). Типы леса обеспечивали 7% вариации запасов углерода в ФН-слое и более 40% вариации запасов углерода минеральных горизонтов (таблица 2).

В МО также очевидны различия в запасах углерода в почве между типами леса, в которых преобладают разные породы деревьев (таблица 6). 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 леса обеспечивали 26% вариации запасов углерода FH-слоя и около 30% вариации запасов углерода минеральных горизонтов (таблица 2).

При рассмотрении лесов БП оказалось, что наибольший запас углерода в слое FH отмечен в лесах БП1, где он был более чем в два раза выше, чем в лесах БП3: 8.6 против 3.4 т/га, соответственно (таблица 7). Леса БП3 характеризовались низкими запасами углерода в минеральном слое 0–30 (33 т/га) (таблица 7). Леса БП2 характеризовались наибольшим запасом углерода в минеральных слоях 0–30 (51 т/га). Запасы углерода в слое 30–50 см сопоставимы во всех трех типах леса и составляли от 7 до 9 т/га. Типы леса в БП обеспечивали 48% вариации запасов углерода слоя FH и более 20% вариации запасов углерода минеральных горизонтов (таблица 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, формируемые древостоями старше 450 лет. При этом, и в тех, и в других лесах самый высокий вклад типа леса в варьирование запасов почвенного углерода в минеральном профиле обнаружен в верхнем слое 0–30см.

Таблица 3. Характеристика гранулометрического состава, растительности, качества опада и запасов почвенного углерода в лесах регионов исследования (по Kuznetsova et al., 2021)

Переменные	ν -тест			Среднее по категории			Ст. откл. по категории			Общее среднее	Общее ст. откл.	p -value		
	СЗК	МО	БП	СЗК	МО	БП	СЗК	МО	БП			СЗК	МО	БП
<i>Гранулометрический состав почвообразующих пород</i>														
Доля частиц <2 $\mu\text{м}$ (%)	2.7	2.0	-4.7	23.1	21.3	1.6	6.5	3.2	0.6	15.3	10.7	0.008	0.041	0.000
<i>Растительность</i>														
Проективное покрытие яр.С (%)	-7.0	6.2	1.6	27.1	78.0	54.0	17.3	7.5	15.0	49.6	24.1	0.000	0.000	0.117
ВН	-2.8	2.9	0.3	18.3	27.0	22.1	9.6	8.7	8.7	21.8	9.5	0.005	0.004	0.786
ВН1	-3.8	5.2	-0.6	9.1	21.8	12.8	5.3	6.8	8.6	13.4	8.5	0.000	0.000	0.530
ВН2	1.3	-3.4	1.6	9.2	5.2	9.3	5.5	2.5	4.7	8.4	4.9	0.210	0.001	0.103
Запасы древесины (т/га)	2.2	-1.5	-0.7	300.5	156.4	188.6	215.8	22.8	59.6	215.1	139.8	0.025	0.123	0.485
<i>Характеристика L подгоризонта подстилки</i>														
СН (%)	4.5	2.8	-7.4	92.7	92.0	86.2	2.2	2.3	6.2	90.3	5.0	0.000	0.005	0.000
С/N	-1.2	1.2	0.0	25	27	26	3	5	8	26	6	0.230	0.226	0.962
pH	1.1	1.9	-3.0	5.8	5.9	5.5	0.5	0.3	0.7	5.7	0.5	0.282	0.055	0.003
N (%)	-0.5	-5.2	5.5	1.6	1.4	1.8	0.2	0.2	0.4	1.6	0.3	0.637	0.000	0.000
<i>Запасы углерода (т/га)</i>														
FN, Cst	-5.6	-4.3	8.5	2.0	0.9	5.2	1.2	1.1	3.2	3.2	2.8	0.000	0.000	0.000
0-30 см, Cst	8.2	1.4	-9.8	82.7	68.4	39.1	26.6	20.7	15.1	64.3	28.6	0.000	0.169	0.000
30-50 см, Cst,	6.2	-0.6	-5.4	26.3	15.3	7.8	14.9	6.0	3.4	16.2	11.6	0.000	0.532	0.000

Аббревиатуры: ст. откл. – стандартное отклонение; СЗК – Северо-Западный Кавказ; МО – Москворецко-Окская равнина; БП – Брянское Полесье; ВН – видовая насыщенность в напочвенном покрове (яр.С); ВН1 – видовая насыщенность трав в яр.С; ВН2 – видовая насыщенность древесных растений в яр.С; СН – степень насыщенности основаниями; N – содержание азота; Cst – запас углерода;

Таблица 4. Однофакторный дисперсионный анализ ANOVA влияния регионов и типов леса на характеристику гранулометрического состава, растительности, качества опада (Kuznetsova et al., 2021)

Переменные	Фактор											
	Регионы			Типы леса СЗК			Типы леса МО			Типы леса БП		
	R ²	p	n	R ²	p	n	R ²	p	n	R ²	p	n
<i>Гранулометрический состав почвообразующих пород</i>												
Доля частиц <2 мкм (%)	0.86	<0.001	27	0.36	0.259	9	0.31	0.123	9	0.44	0.179	9
<i>Растительность</i>												
Проективное покрытие яр.С (%)	0.64	<0.001	100	0.82	<0.001	36	0.25	0.018	22	0.37	<0.001	42
ВН	0.12	0.002	100	0.72	<0.001	36	0.58	<0.001	22	0.93	<0.001	42
ВН1	0.31	<0.001	100	0.72	<0.001	36	0.50	<0.001	22	0.63	<0.001	42
ВН2	0.12	0.003	100	0.44	<0.001	36	0.57	<0.001	22	0.13	0.068	42
Запасы древесины (т/га)	0.20	0.066	27	0.89	0.001	9	0.55	0.022	9	0.75	0.016	9
<i>Характеристика L подгоризонта подстилки</i>												
СН (%)	0.35	<0.001	157	0.13	0.021	57	0.00	0.907	47	0.74	<0.001	53
С/N	0.01	0.380	157	0.16	0.010	57	0.05	0.118	47	0.52	<0.001	53
pH	0.06	0.010	157	0.09	0.074	57	0.01	0.560	47	0.80	<0.001	53
N (%)	0.25	<0.001	157	0.46	<0.001	57	0.07	0.078	47	0.43	<0.001	53

Аббревиатуры: СЗК – Северо-Западный Кавказ; МО – Москворецко-Окская равнина; БП – Брянское Полесье; ВН – видовая насыщенность в напочвенном покрове (яр.С); ВН1 – видовая насыщенность трав в яр.С; ВН2 – видовая насыщенность древесных растений в яр.С; СН – степень насыщенности основаниями; N – содержание азота; R²— коэффициент детерминации, p—p-value ANOVA F-тест

Таблица 5. Характеристика гранулометрического состава, растительности, качества опада и запасов почвенного углерода в лесах Северо-Западного Кавказа (по Kuznetsova et al., 2021)

Переменные	v-тест			Среднее по категории			Ст. откл. по категории			Общее среднее	Общее ст. откл.	p-value		
	СЗК1	СЗК2	СЗК3	СЗК1	СЗК2	СЗК3	СЗК1	СЗК2	СЗК3			СЗК1	СЗК2	СЗК3
<i>Гранулометрический состав почвообразующих пород</i>														
Доля частиц <2 мкм (%)	0.8	0.9	-1.7	25.5	25.9	17.9	5.8	8.3	2.0	23.1	6.5	0.432	0.359	0.089
<i>Растительность</i>														
Проективное покрытие яр.С (%)	3.3	2.0	-5.3	40.4	35.4	5.5	7.5	10.5	1.4	27.1	17.3	0.001	0.041	0.000
ВН	2.7	2.4	-5.0	24.3	23.6	6.9	5.2	6.7	3.3	18.3	9.6	0.008	0.018	0.000
ВН1	2.9	2.1	-5.0	12.8	11.7	2.8	3.0	3.4	2.3	9.1	5.3	0.004	0.040	0.000
ВН2	1.8	2.1	-3.9	11.5	11.9	4.1	4.4	5.6	1.9	9.2	5.5	0.072	0.034	0.000
Запасы древесины (т/га)	-1.4	-1.3	2.7	157.0	172.5	571.9	18.4	45.0	134.3	300.5	215.8	0.159	0.209	0.008
<i>Характеристика L подгоризонта подстилки</i>														
СН (%)	2.4	0.0	-2.3	93.7	92.7	91.8	1.9	2.2	2.2	92.7	2.2	0.016	0.994	0.019
С/N	-3.0	1.5	1.5	23	26	26	2	3	4	25	3	0.003	0.146	0.144
pH	2.1	-1.7	-0.4	6.0	5.6	5.8	0.6	0.6	0.4	5.8	0.5	0.034	0.090	0.686
N (%)	4.7	-0.4	-4.1	1.8	1.6	1.4	0.2	0.1	0.2	1.6	0.2	0.000	0.682	0.000
<i>Запасы углерода (т/га)</i>														
FN, Cst	-1.9	2.6	-0.8	1.7	2.5	1.9	0.8	1.7	0.8	2.0	1.2	0.058	0.010	0.425
0-30 см, Cst	1.9	4.5	-6.5	90.6	98.6	58.2	22.0	24.1	11.2	82.7	26.6	0.052	0.000	0.000
30-50 см, Cst,	0.4	2.6	-2.9	27.8	34.8	16.5	14.6	6.7	2.9	26.3	14.9	0.707	0.009	0.003

Аббревиатуры: СЗК1 – Осиново-Грабовый; СЗК2 – Буково-пихтово-грабовый; СЗК3 – Пихтово-Буковый; ст. откл. – стандартное отклонение; ВН – видовая насыщенность в напочвенном покрове (яр.С); ВН1 – видовая насыщенность трав в яр.С; ВН2 – видовая насыщенность древесных растений в яр.С; СН – степень насыщенности основаниями; N – содержание азота; Cst – запас углерода;

Таблица 6. Характеристика гранулометрического состава, растительности, качества опада и запасов почвенного углерода в лесах Москворецко-Окской равнины (по Kuznetsova et al., 2021)

Переменные	ν -тест		Среднее по категории		Ст. откл. по категории		Общее среднее	Общее ст. откл.	p -value	
	МО 1	МО 2	МО1	МО2	МО1	МО2			МО1	МО2
<i>Гранулометрический состав почвообразующих пород</i>										
Доля частиц <2 мкм (%)	1.6	-1.6	22.5	18.9	3.3	1.1	21.3	3.2	0.118	0.118
<i>Растительность</i>										
Проективное покрытие яр.С (%)	2.3	-2.3	80.7	73.1	7.0	5.9	78.0	7.5	0.023	0.023
ВН	-3.5	3.5	22.1	35.6	6.7	3.5	27.0	8.7	0.001	0.001
ВН1	-3.2	3.2	18.2	28.0	5.6	3.3	21.8	6.8	0.001	0.001
ВН2	-3.4	3.4	3.9	7.6	1.5	1.9	5.2	2.5	0.001	0.001
Запасы древесины (т/га)	-2.1	2.1	145.1	178.9	18.9	6.5	156.4	22.8	0.036	0.036
<i>Характеристика L подгоризонта подстилки</i>										
СН (%)	-0.1	0.1	92.0	92.0	2.5	2.2	92.0	2.3	0.905	0.905
С/N	1.6	-1.6	28	25	5	6	27	5	0.117	0.117
pH	-0.6	0.6	5.8	5.9	0.3	0.2	5.9	0.3	0.554	0.554
N (%)	-1.8	1.8	1.3	1.5	0.2	0.3	1.4	0.2	0.079	0.079
<i>Запасы углерода (т/га)</i>										
FN, Cst	-2.4	2.4	0.1	1.2	0.05	1.1	0.9	1.1	0.015	0.015
0-30 см, Cst	-4.1	4.1	59.5	79.9	12.0	23.9	68.4	20.7	0.000	0.000
30-50 см, Cst,	-1.5	1.5	14.3	17.0	14.6	6.7	15.3	6.0	0.125	0.125

Аббревиатуры: МО1 – Березово-липовый; МО2 – Широколиственно-еловый; ст. откл. – стандартное отклонение; ВН, видовая насыщенность яруса трав (яр.С); ВН – видовая насыщенность в напочвенном покрове (яр.С); ВН1 – видовая насыщенность трав в яр.С; ВН2 – видовая насыщенность древесных растений в яр.С; СН – степень насыщенности основаниями; N – содержание азота; Cst – запас углерода;

Таблица 7. Характеристика гранулометрического состава, растительности, качества опада и запасов почвенного углерода в лесах Брянского Полесья (по Kuznetsova et al., 2021)

Переменные	ν -тест			Среднее по категории			Ст. откл. по категории			Общее среднее	Общее ст. откл.	p -value		
	БП1	БП2	БП3	БП1	БП2	БП3	БП1	БП2	БП3			БП1	БП2	БП3
<i>Гранулометрический состав почвообразующих пород</i>														
Доля частиц <2 мкм (%)	-1.7	1.5	0.3	1.1	2.1	1.7	0.7	0.7	0.2	1.6	0.6	0.083	0.141	0.797
<i>Растительность</i>														
Проективное покрытие яр.С (%)	-2.0	-1.9	3.9	47.5	47.9	66.8	11.6	15.4	8.7	54.0	15.0	0.045	0.058	0.000
ВН	-5.0	-0.7	5.7	12.6	20.7	32.9	2.4	2.1	2.5	22.1	8.7	0.000	0.469	0.000
ВН1	-3.9	-1.0	4.8	5.6	11.0	21.9	2.6	2.6	8.5	12.8	8.6	0.000	0.335	0.000
ВН2	-2.2	0.4	1.7	7.1	9.7	11.1	1.0	2.4	7.3	9.3	4.7	0.030	0.675	0.081
Запасы древесины (т/га)	-2.4	1.0	1.4	120.1	216.8	228.8	18.7	34.8	44.7	188.6	59.6	0.015	0.315	0.152
<i>Характеристика L подгоризонта</i>														
СН (%)	-5.8	0.5	5.0	78.7	86.8	91.4	4.3	3.2	2.1	86.2	6.2	0.000	0.606	0.000
С/N	5.1	-1.1	-3.7	34	24	21	7	6	4	26	8	0.000	0.268	0.000
pH	-6.2	1.0	4.8	4.7	5.7	6.1	0.4	0.3	0.3	5.5	0.7	0.000	0.312	0.000
N (%)	-4.6	1.1	3.3	1.4	1.9	2.0	0.3	0.4	0.2	1.8	0.4	0.000	0.258	0.001
<i>Запасы углерода (т/га)</i>														
FH, Cst	6.0	-0.6	-4.8	8.6	4.8	3.4	2.3	3.5	1.2	5.2	3.2	0.000	0.551	0.000
0-30 см, Cst	-0.3	4.2	-3.5	38.2	50.7	33.0	12.7	18.3	9.9	39.1	15.1	0.753	0.000	0.001
30-50 см, Cst,	1.3	-1.4	0.3	9.2	6.9	8.0	3.3	2.4	4.3	7.8	3.4	0.197	0.174	0.761

Аббревиатуры: БП1 – Сосняк кустарничково-зеленомошный; БП2 – Сосняк сложный; БП3 – Полидоминантный широколиственный с елью; ст. откл. – стандартное отклонение; ВН – видовая насыщенность в напочвенном покрове (яр.С); ВН1 – видовая насыщенность трав в яр.С; ВН2 – видовая насыщенность древесных растений в яр.С; СН – степень насыщенности основаниями; N – содержание азота; Cst – запас углерода;

Применяли иерархический анализ их индивидуального вклада (независимый) и вклада с учетом одновременного влияния других информативных предикторов (совместный) в варьирование запасов почвенного углерода (рис.21). Для иерархического анализа выбраны следующие переменные: (1) запас ствольной древесины; (2) общая видовая насыщенность растений в ярусах А и В; (3) видовая насыщенность древесных растений в ярусе трав (ярус С); (4) отношение С/Н и степень насыщенности основаниями L-подгоризонта подстилки; (5) содержание глинистых частиц в почвообразующей породе,.

Также был проведен предварительный анализ вклада различных показателей почвенной макрофауны, включая их численность и биомассу (Гераськина, 2020). Среди них наибольший вклад в варьирование запасов почвенного углерода продемонстрировала биомасса функциональных групп дождевых червей, связанных с органическими или минеральными слоями, которая также была включена в иерархический анализ.

Как и следовало ожидать, доля глинистых частиц в почвообразующей породе, так же как и общая биомасса сапрофагов, вносит значительный вклад в вариацию запасов углерода. Однако, предикторы, связанные с растительностью, также обуславливают наибольший индивидуальный вклад (более 30%) в вариацию запасов углерода. Иерархический анализ показал, что около 18% и 23% вариации обусловлены изменением качества опада, индикаторами которого выступали отношение С/Н и степень насыщенности основаниями подгоризонта опада подстилки (L-подгоризонт). Индивидуальный независимый вклад этих переменных составил 30% и 38%, соответственно. Корреляция запасов С в слое FH со степенью насыщенности основаниями подгоризонта опада отрицательная, а с соотношением С/Н - положительная. Чем богаче опад питательными веществами, тем быстрее разлагается органический горизонт, что приводит к уменьшению его запасов и, соответственно, запасов углерода в нем. Отмечен незначительный индивидуальный независимый вклад других предикторов (не более 5%),

связанных с растительностью, таких как видовая насыщенность древесных растений в ярусе трав, видовая насыщенность растений в ярусах А+В и запасы стволовой древесины (рис. 21).

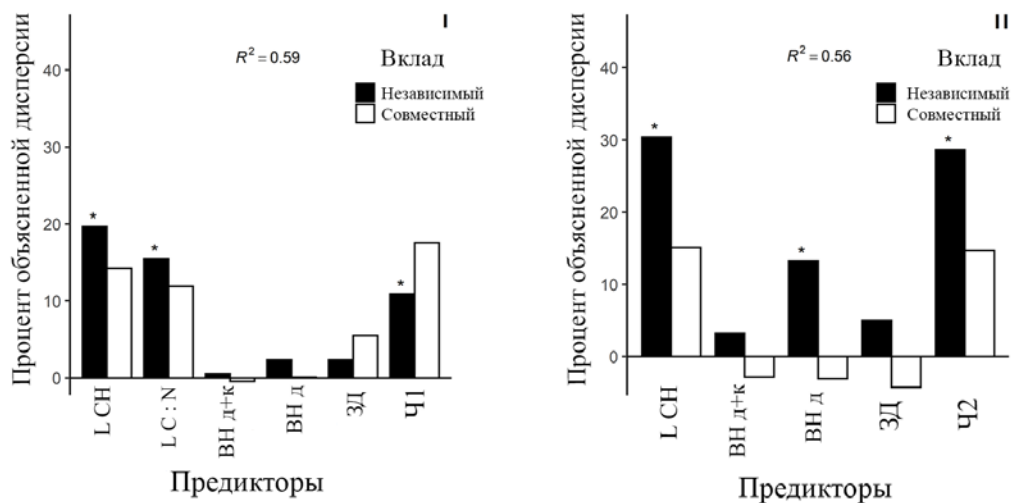


Рисунок 21. Вклад основных предикторов в дисперсию (I) запасов углерода в органогенных горизонтах (FH-слой подстилки) и (II) запасов углерода в почве в 50-см минеральном слое. Независимые переменные: L CH – степень насыщенности основаниями в подгоризонте L подстилки; L C:N - соотношение C/N в подгоризонте L подстилки; ВН д+к – общая видовая насыщенность ярусов кустарников и деревьев; ВН д – видовая насыщенность древесных растений в ярусе С; ЗД – запас стволовой древесины; Ч1 – биомасса функциональных групп дождевых червей, связанных с органическим горизонтом; Ч2 – биомасса функциональных групп дождевых червей, связанных с минеральными горизонтами почвы; звездочками обозначена значимость: * — $p \leq 0.5$. На рисунке 2 вида вкладов и R^2 для полной модели. Проценты по оси ординат рассчитаны от дисперсии, объясненной моделью, не от общей вариации в данных.

Степень насыщенности основаниями подгоризонта опада вносила значительный вклад и в вариацию запасов углерода в 50-сантиметровом минеральном слое (21% дисперсии). Вклад видовой насыщенности древесных растений в травяном ярусе также высок (16%). Индивидуальный независимый вклад этих переменных составил 38% и 9% соответственно. Видовая насыщенность древесных растений в травяном ярусе имела самую высокую независимость, о чем свидетельствует самое высокое соотношение независимого и совместного вклада (рис. 21). Значительный вклад в вариацию запасов углерода в минеральном профиле вносит биомасса функциональных групп дождевых червей, связанных с минеральными горизонтами, причем

корреляция положительная (Kuznetsova et al, 2021). В отличие от органического горизонта, корреляция между степенью насыщенности основаниями в подгоризонте опада и запасами углерода в 50-сантиметровом минеральном слое становится положительной. С увеличением степени насыщенности основаниями подгоризонта опада и видовой насыщенности древесных растений в травяном ярусе увеличивались запасы углерода в минеральных горизонтах почв. Индивидуальный независимый вклад предикторов, оказывающих незначительное независимое влияние, таких как общая видовая насыщенность в ярусах кустарников и деревьев и запас стволовой древесины, в изменение запасов углерода составил не более 6%.

3.2 СОСТАВ РАСТИТЕЛЬНОСТИ И ЗАПАСЫ ПОЧВЕННОГО УГЛЕРОДА

Растительность является источником почвенного органического вещества за счет опада надземных и подземных органов. Для оценки роли растительности в накоплении углерода в почве важно учитывать не только количество, но и качество опада, на что указывают результаты иерархического разложения, где вклад качества подгоризонта опада в запасы углерода в слое FH подстилки значительно превышал вклад запаса стволовой древесины (рис. 21).

Растения, принадлежащие к разным видам, продуцируют опад разного качества. По качеству опада виды растений можно объединить в функциональные группы (Cornelissen et al., 2007). Наибольшие запасы углерода в 50-сантиметровых минеральных слоях обнаружены в лесах с более высоким разнообразием видов растений: леса типа СЗК2 и леса типа МО2. Это может быть связано с тем, что быстрое разложение опада высокого качества, к которому относится опад неморальных трав и лиственных деревьев, способствует интенсивным потокам углерода в минеральные слои. Однако в то же время в этих типах лесов наблюдался относительно высокий запас углерода в FH-слое подстилки, что можно объяснить вкладом подрастающей пихты в типе леса СЗК2 и ели в типе леса МО2. Как известно, опад этих

хвойных пород разлагается медленно, что объясняет накопление массы органического горизонта. В регионе БП, так же как в МО и СЗК наибольшие запасы в 50-сантиметровом слое обнаружены в смешанных лесах, где, наряду с хвоей сосны, присутствует опад лиственных деревьев. Неморальные травы также вносят значительный вклад в общее количество активного опада.

По сравнению со смешанными лесами, в лесах СЗКЗ с преобладанием бука и пихты отмечены относительно низкие запасы углерода в минеральных слоях, что можно объяснить почти неразвитым травяным покровом (3% покрытия) и одиночными лиственными деревьями с опадом высокого качества.

Наряду с качеством опада, видовая насыщенность древесных растений в ярусе трав оказалась информативным предиктором запаса углерода в ФН-слое подстилки и 50-сантиметровом минеральном слое. Этот показатель можно рассматривать как интегральный, 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 древесных пород и, следовательно, прошлую историю, когда другие виды древесных растений могли доминировать в верхних ярусах и вносить вклад в запасы углерода в минеральных слоях почвы. Положительная связь между содержанием углерода в почве и разнообразием деревьев показана ранее (Bakhshandeh-Navroud et al., 2018). Согласно иерархическому разложению, в отличие от яруса трав, общая видовая насыщенность в ярусах деревьев и кустарников вносит менее значительный вклад в изменение запасов углерода в почве (рис.20).

В лесах СЗК и БП видовая насыщенность древесных растений в травяном ярусе почти всегда выше, чем в кустарниковом и древесном ярусах вместе взятых. Это связано с благоприятными условиями для прорастания семян и вселением всего спектра видов, характерных для этих территорий, а

также с более богатым составом кустарничков. Феномен масс-эффекта (Shmida and Ellner, 1984) указывает на высокую неоднородность условий в лесах СЗК и БП.

В лесах МО видовая насыщенность древесных растений в напочвенном покрове почти всегда меньше суммарной видовой насыщенности в ярусах кустарничков и деревьев (Kuznetsova et.al, 2021). В березово-липовых лесах *Carex pilosa* имеет высокое проективное покрытие, которое может препятствовать проникновению семян древесных растений в почву и их прорастанию. Более того, имеющиеся данные (Смирнова, 1980) указывают на то, что *Carex pilosa* подавляет конкурентов, в основном, за счет мощной хорошо развитой корневой системы.

Таким образом, видовое разнообразие растений влияет на запас углерода в почве: наибольший запас углерода в минеральных слоях почвы обнаружен в смешанных лесах с большим разнообразием древесных и травянистых растений с разным качеством опада.

3.3 КАЧЕСТВО ОПАДА И ЗАПАСЫ УГЛЕРОДА В ПОЧВЕ

Качество опада регулируется составом растительности и является информативным показателем запаса углерода в почве. Согласно иерархическому анализу, степень насыщенности основаниями и отношение C/N в подгоризонте опада подстилки, являются индикаторами его качества и информативными предикторами запаса углерода в FN-слое подстилки и минеральном 50-сантиметровом слое. Сравнение объектов трех регионов показало (таблица 3), что самое низкое качество подгоризонта опада с относительно низкой степенью насыщенности основаниями (86%) и низким уровнем рН (5.5) характерно для лесов БП, в то время как леса СЗК характеризовались высокой степенью насыщенности основаниями (93%), что свидетельствует о высоком качестве опада. Высокие значения рН в подгоризонте опада подстилки обнаружены на участках МО (5.9).

При сравнении качества опада лесов СЗК установлено (таблица 4), что степень насыщенности основаниями варьировала незначительно: от 94% в лесах СЗК1 до 92% в лесах СЗК3. Наименьшее соотношение С/Н в L-подгоризонте подстилки (23) обнаружено в лесах СЗК1. Значения рН и содержание N в L-подгоризонте подстилки всех типов леса сопоставимы (таблица 4). В лесах МО1 и МО2 характеристики качества подгоризонта опада, такие как степень насыщенности основаниями, N, рН и С/Н сопоставимы (таблица 5). При сравнении качества подгоризонта опада (таблица 6) установлено, что этот подгоризонт подстилки в лесах БП3 имеет самые высокие значения степени насыщенности основаниями (91%), значения рН (6.1) и содержание N (2%), тогда как СН, рН и содержание N в L-подгоризонте подстилки лесов БП1 значительно ниже (79%, 4.7% и 1.4%, соответственно). Самое высокое соотношение С/Н в L-подгоризонте подстилки обнаружено в лесах БП1 (34), а самое низкое - в лесах БП3 (21). Леса БП2 занимали промежуточное положение, однако по качеству опада были ближе к широколиственному типу (таблица 6).

Опад хвои сосны беден азотом (часто ниже 0.4%) (Berg and McClaugherty, 2020), опад бореальных кустарничков богат полифенольными соединениями (Wardle et al., 2003), а зеленые мхи имеют низкое содержание питательных веществ (Hilli, 2013). В лесах МО и СЗК, а также в лесах БП3 преобладают растения с высоким качеством опада. В этих лесах опад относительно богат азотом: береза – 0.7%, бук – 0.9%, осина – 1.0%, граб – 1.1%, дуб – 1.2%, клен – 1.3% и липа – 1.5% (Simon et al., 2020). Чем богаче подстилка питательными веществами, тем быстрее она разлагается почвенной биотой, что приводит к уменьшению массы органического горизонта и, соответственно, запасов углерода в нем.

В горных лесах СЗК2 и в равнинных лесах МО2 высокие запасы углерода в слое FH подстилки и в 50-сантиметровом минеральном слое почв можно объяснить влиянием смешанного опада с быстро и медленно разлагаемыми компонентами. Низкое качество опада ели и пихты объясняет

накопление массы органического горизонта, являющегося средой обитания сапрофагов, функционально связанных с этим горизонтом (Huang et al., 2020). В то же время значительный вклад трав, наряду с листовным древесным опадом высокого качества, обеспечивает активную переработку опада почвенными сапрофагами. В типах леса МО1 и СЗК3 с низким видовым богатством растений запасы углерода в минеральных слоях самые низкие. Также в лесах этих типов отмечено самое низкое функциональное разнообразие дождевых червей (Kuznetsova et al., 2021).

В песчаных почвах создаются менее благоприятные условия для деятельности почвенных сапрофагов по сравнению с суглинистыми почвами (Zhang et al., 2007). Поэтому в лесах БП отмечены самые высокие запасы углерода подстилки. Наибольшие запасы углерода в слое FH подстилки характерны для лесов БП1, что связано с опадом низкого качества и, как следствие, низкой активностью макросапрофагов. У типов БП2 и БП3 качество опада выше за счет вклада неморальных трав и листовных деревьев, что приводит к увеличению активности макросапрофагов, вызывая снижение запасов подстилки и запаса углерода в ней.

Из-за низкой активности макросапрофагов в лесах БП, запасы углерода в минеральных горизонтах почвы лесов БП в основном регулируются микробиотой. Однако на запасы минеральных горизонтов почв также могут сильно влиять и абиотические факторы, такие как водный режим. В лесах БП3 относительно низкие запасы углерода в слое 0–50 см могут быть связаны с застоем грунтовых вод и процессами оглеения, которые могут способствовать вымыванию соединений углерода за пределы лесной экосистемы. Масштабные изменения гидрологического режима в настоящее время наблюдаются на обширных территориях европейской части России (Leskinen et al., 2020).

Таким образом, существует связь между качеством опада и запасами почвенного углерода хвойно-широколиственных лесов, но также и абиотические факторы, такие как гранулометрический состав

почвообразующих пород и водный режим, влияют на запасы углерода в почве.

ВЫВОДЫ

1. Результаты исследования подтвердили влияние климата и почвообразующих пород на запасы углерода в почве.

2. Запасы углерода в почве регулируются свойствами подгоризонта опада подстилки. Важными предикторами изменения запасов углерода в почве являются показатели качества подгоризонта опада, такие как степень насыщенности основаниями и отношение C/N. Самые высокие запасы углерода в FH слое подстилки связаны с подгоризонтом опада низкого качества, т.е. с низкой степенью насыщенности его основаниями, высокой кислотностью и высоким отношением C/N.

3. Наряду с качеством подгоризонта опада подстилки, информативным предиктором запаса углерода в слое FH и 50-сантиметровом минеральном слое оказалась видовая насыщенность древесных растений в ярусе трав. Этот параметр можно рассматривать как интегральный показатель, учитывающий разнообразие древесных видов всех ярусов растительности, поскольку обновление всех видов происходит непосредственно в ярусе трав. 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, образующих опад разного качества, формируемого хвойными породами (низкое качество), с одной стороны, и неморальными травами, липой, березой и грабом, с другой стороны. Таким образом, более высокое функциональное разнообразие растений способствует увеличению запасов углерода в почве в хвойно-широколиственных лесах.

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

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 (Kalbitz and 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). 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 может составлять более 15% от экосистемной нетто продуктивности (Nakhavali et al., 2021). Локальные оценки в сосновых лесах умеренного пояса в Бельгии показали, что почвенный РОУ может составлять 11% от экосистемной нетто продуктивности (Gielen et al., 2011). Вклад выноса углерода с почвенными водами в лесных экосистемах Валдайского национального парка в поступление органического углерода в оз. Гусиное может составлять до 8% от общего запаса углерода в водной экосистеме (Гашкина и др., 2020).

Экспериментальные измерения выноса углерода с почвенными водами в многолетней динамике в лесах России разных типов выполняются точечно и не систематизированы. Многолетние (более 20 лет) измерения выноса соединений углерода с почвенными водами осуществляются в северо-таежных лесах Мурманской области (Ершов, 2021; Ершов и др., 2019, Лукина, Никонов, 1998). Существуют оценки содержания углерода в почвенных водах за отдельные годы в среднетаежных лесах Республики

Карелия (Шильцова, Ласточкина, 2006), Республики Коми (Арчегова, Кузнецова, 2011; Пристова, Забоева, 2007). В сложных ельниках и смешанных хвойных лесах Московской области проводился четырехлетний мониторинг выноса углерода с почвенными водами (Султанбаева и др., 2015). Все эти исследования выполнены с применением методов, принятых в программе ICP Forests (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 (Тебенькова и др., 2019).

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.

4.1 СОДЕРЖАНИЕ УГЛЕРОДА В АТМОСФЕРНЫХ ВЫПАДЕНИЯХ И В ПОЧВЕННЫХ ВОДАХ

Концентрации РОУ в атмосферных выпадениях БП составляла в среднем 17.4 ± 1.2 мг/л против 73.0 ± 5.0 мг/л и 64.9 ± 11.8 мг/л в почвенных водах, прошедших через подстилку и ВГ горизонт, соответственно. Концентрации РОУ в атмосферных выпадениях лесов МО также значительно ниже ($p < 0.001$), чем в почвенных водах и составляла в среднем 21.4 ± 2.7 мг/л против 49.5 ± 5.5 мг/л и 37.5 ± 5.6 мг/л в почвенных водах, прошедших через подстилку и ВГ горизонт, соответственно. Как в лесах МО, формирующихся на суглинистых почвообразующих породах, так и в лесах БП на песках, самые высокие концентрации РОУ отмечены в подстилочных водах (таблица 8).

Концентрации РОУ в атмосферных выпадениях в разных типах леса демонстрируют высокую вариабельность, что, по всей видимости, связано со структурным разнообразием сообщества, поскольку самые высокие коэффициенты вариации концентрации РОУ отмечены в лесах с самым высоким биоразнообразием (например, леса БПЗ или МО2).

В лесах БП в среднем концентрации РОУ в атмосферных выпадениях значительно ниже в полидоминантных широколиственных лесах с елью ($p < 0.001$), за счет вклада окон, где отмечено самое низкое содержание РОУ.

В лесах МО оконная динамика характерна для обоих типов леса. В среднем за двухлетнюю динамику самые высокие концентрации РОУ в атмосферных выпадениях отмечены в широколиственно-еловых лесах ($p < 0.005$), за счет вклада ели, подкроновые воды которой обогащены РОУ.

Как в лесах на суглинках, так и в лесах на песках самые низкие концентрации РОУ в атмосферных выпадениях отмечены в лесах с минимальным участием хвойных деревьев, а именно в березово-липовых лесах МО и полидоминантных широколиственных лесах с елью БП (Таблица 8).

На поступление органического углерода с атмосферными выпадениями влияет древесный полог сосняка кустарничково-зеленомошного, который отличается ажурностью, что способствует проникновению большого количества осадков, а также формированию значительного объема стволовых вод (Лукина и др., 2018). В более смешанных лесах (сосняках сложных), формируемых древостоем старшего возраста, более сомкнутый полог, особенно во время пика развития ассимиляционного аппарата (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. 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).

Снижение потока углерода в межкروновых пространствах за счет уменьшения концентрации РОУ характерно для лесных экосистем (Ершов, 2021). Высокое содержание РОУ в атмосферных выпадениях сосновых лесов также отмечалось в ряде работ, где повышенное содержание углерода в атмосферных выпадениях хвойных лесов объяснялось высокой шероховатостью поверхности (Султанбаева и др., 2015; Аккумуляция..., 2018).

Выщелачивание РОУ из лесной подстилки – один из основных путей миграции углерода в более глубокие горизонты почвы (Fröberg et al., 2011). Растворенное органическое вещество, мигрирующее из верхних горизонтов почв в более глубокие, может фиксироваться в них, что приводит к увеличению депонирования С в почве (Kalbitz and Kaiser, 2008). При значительной вариабельности можно отметить более высокую концентрацию РОУ в подстилочных водах сосняков кустарничково-зеленомошных (таблица 8).



А



Б

Рисунок 22. Более мощная подстилка (А) сосняков кустарничково-зеленомошных и менее мощная подстилка (Б) полидоминантных широколиственных лесов с елью Брянского Полесья.

Таблица 8. Характеристика концентраций РОУ в атмосферных выпадениях и почвенных водах (мг С/л), поступления и выноса углерода с почвенными водами (кг С/ (га год), потоки элементов (кг С/(га год), характеризующие разницу между поступлением соединений углерода с атмосферными выпадениями и их выносом с почвенными водами, в доминирующих типах равнинных хвойно-широколиственных лесов

Параметр	ν-тест					Среднее по категории					Ст. откл. по категории					Общее среднее	Общее ст. откл.	p-value				
	БП1	БП2	БП3	МО1	МО2	БП1	БП2	БП3	МО1	МО2	БП1	БП2	БП3	МО1	МО2			БП1	БП2	БП3	МО1	МО2
<i>Атмосферные выпадения</i>																						
Концентрации РОУ, мг С/л	0.1	1.1	-2.5	-1.9	3.9	18.8	21.5	14.3	13.3	29.4	12.9	12.0	17.1	11.7	28.9	18.6	18.0	0.929	0.255	0.011	0.057	0.000
Поступление, кг С/(га год)	-0.6	-0.6	-1.2	0.3	2.4	59.8	60.8	47.6	85.0	148.0	6.6	6.4	4.0	37.8	98.5	74.7	46.3	0.525	0.554	0.250	0.733	0.015
<i>Подстилочные воды (LFH)</i>																						
Концентрации РОУ, мг С/л	2.8	1.6	-0.3	-4.7	0.9	84.1	76.2	59.7	28.8	68.3	69.1	40.1	26.2	15.5	63.2	62.2	51.3	0.006	0.107	0.748	0.000	0.364
Вынос, кг С/(га год)	0.8	-0.5	-2.0	0.4	1.6	56.4	36.5	13.8	51.9	74.4	38.8	21.0	7.7	5.5	33.6	44.1	29.6	0.408	0.612	0.044	0.684	0.115
<i>Почвенные воды, прошедшие E/BF горизонт</i>																						
Концентрации РОУ, мг С/л	1.2	0.2	1.8	-1.6	-0.7	64.0	51.8	70.1	33.4	41.2	38.5	11.7	86.2	44.6	37.5	46.6	50.0	0.215	0.833	0.078	0.103	0.482
Вынос, кг С/(га год)	-0.8	-1.3	-0.9	1.2	2.4	11.5	6.0	10.2	37.5	54.2	10.9	9.2	13.3	17.2	25.6	20.5	21.9	0.415	0.192	0.354	0.233	0.018
<i>Потоки элементов</i>																						
Поглощение /вынос гор-та LFH	-1.4	-0.3	0.2	0.1	1.7	3.3	24.3	33.8	33.1	73.7	45.3	27.0	8.2	43.3	64.9	30.6	38.6	0.163	0.748	0.870	0.922	0.086
Поглощение/вынос гор-та E/BF(BT)	1.6	0.5	-1.5	-0.5	-0.2	45.0	30.4	3.6	14.4	20.2	43.9	24.1	5.6	22.7	8.0	23.6	26.7	0.113	0.611	0.140	0.599	0.846

Аббревиатуры: ст. откл. – стандартное отклонение; МО1 – Березово-липовый; МО2 – Широколиственно-еловый; БП1 – Сосняк кустарничково-зеленомошный; БП2 – Сосняк сложный; БП3 – Полидоминантный широколиственный с елью;

Источником для РОУ в сосновых лесах является мощная, развитая подстилка, отличающаяся низким качеством опада. Запасы подстилки (LFH-слой) 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 (рис. 22).

Подтверждают данную закономерность и самые низкие концентрации РОУ ($p < 0.001$) в водах из подстилки березово-липовых лесов Москворецко-Окской равнины, где отмечены самые низкие запасы углерода подстилки (таблица 6).

На поток РОУ из подстилки могут влиять и такие свойства растительности как количество и качество опада, определяющие основные свойства органогенных горизонтов почв. Отмеченные в нашем исследовании связи запасов подстилки и концентрации РОУ отмечены и ранее: в лесах с более развитой подстилкой и низкой долей участия лиственных деревьев отмечен более интенсивный вынос РОУ (Fröberg et al., 2011).

Результаты других исследований показывают, что смешивание медленно разлагаемой подстилки, формируемой опадом низкого качества, и быстро разлагаемой подстилкой, формируемой опадом высокого качества, способствует более высокой эффективности переноса соединений углерода в минеральные горизонты почв (Cotrufo et al., 2013; Lehmann and Kleber, 2015; Córdova et al., 2018), в основном за счет увеличения потока РОУ из развитой подстилки, с одной стороны (Fröberg et al., 2011), и за счет добавления легкодоступного азота быстроразлагаемых фракций опада, с другой. Подтверждают данную закономерность и более высокие концентрации РОУ в водах из подстилки, широколиственно-еловых лесов Москворецко-Окской равнины, где отмечены, с одной стороны, самые высокие запасы подстилки (LFH-слой) за счет вклада ели, с другой стороны, более высокое содержание азота за счет вклада лиственных деревьев и неморальных трав: 1.5% в широколиственно-еловых против 1.3% в липово-березовых лесов (таблица 6). Такой же 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 (Семенюк и др., 2021). Это подтверждают и данные о высоком содержании азота в подстилке лесов этого типа, достигающем 1.9%, в то время как в сосняках кустарничково-зеленомошных не превышающем 1.4 % (таблица 7).

При анализе воды, прошедшей органические и минеральные горизонты, установлено, что в сосняках кустарничково-зеленомошных Брянского Полесья концентрация РОУ в ней незначительно снижается (летний период) или в среднем остается без изменения (весенне-осенний период) по сравнению с подстилочными водами. В полидоминантных широколиственных лесах с елью вынос отмечается единично. В сосняках сложных в вегетационный период (весна, лето, осень) вынос отмечается единично и имеется тенденция к уменьшению концентрации РОУ, что может свидетельствовать о закреплении части углерода в минеральной части профиля. Это подтверждают данные о самых высоких запасах углерода в слое 0-50 в лесах этого типа – 57 т/га, в то время как в полидоминантных широколиственных – 41 т/га, а сосняках кустарничково-зеленомошных – 48 т/га (таблица 7).

Оценка внутрипрофильного изменения концентрации РОУ в почвах лесов Москворецко-Окской равнины демонстрирует отсутствие изменения концентрации РОУ в березово-липовых лесах и значительное уменьшение его концентрации в нижней части профиля в широколиственно-еловых лесах ($p < 0.01$), что также может свидетельствовать о закреплении части углерода в минеральной части профиля в лесах этого типа. Это подтверждают данные о самых высоких запасах углерода в слое 0-50 см – 97 т/га, в то время как в березово-липовых – 74 т/га.

Также стоит отметить, что поток РОУ в водах из подстилки во всех типах леса, кроме березово-липового, где отмечена фрагментарная, слабо развитая подстилка, значителен (таблица 8), что может

свидетельствовать о высоком потенциале фиксации соединений углерода в нижних минеральных горизонтах, то есть его сорбции горизонтом В (Караванова, 2020).

4.2 ОЦЕНКА ГОДОВЫХ ПОТОКОВ УГЛЕРОДА В АТМОСФЕРНЫХ ВЫПАДЕНИЯХ И ПОЧВЕННЫХ ВОДАХ

В Брянском Полесье поступление углерода с промывающими полог дождевыми и снеговыми осадками в сосняках кустарничково-зеленомошных и сосняках сложных составляло около 60 кг С/(га год) и оказалось выше, чем в полидоминантных лесах, где уровень поступления составляет 47 кг С/(га год). В сосновых лесах годовой уровень поступления соединений углерода значительно выше, чем в полидоминантных широколиственных лесах с елью за счет более высоких концентраций. Годовой вынос углерода с подстилочными водами в сосняках кустарничково-зеленомошных составил 56 кг С/(га год), в сосняках сложных - 36 кг С/(га год), в хвойно-широколиственных лесах отмечен самый низкий вынос углерода - 14 кг С/(га год). Случаи выноса органического углерода из нижних минеральных горизонтов в лесах Брянского Полесья 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 кг С/(га год), в сосняках сложных - 6 кг С/(га год), в хвойно-широколиственных лесах - 10 кг С/(га год) (таблица 8).

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. Оценка поглощения углерода в минеральных горизонтах на основании разницы выноса углерода из подстилки и нижних минеральных горизонтов показывает, что в сосняках кустарничково-зеленомошных

поглощение происходит также круглогодично. В сосняках сложных углерод поглощается, в основном, в летний сезон, в то время как в зимний и весенний периоды преобладают процессы выноса. В полидоминантных широколиственных лесах с елью поглощение самое низкое по сравнению с другими типами леса, т.е. практически не происходит, с отрицательным балансом в весенний период.

В березово-липовых лесах Московской области поступление углерода составляло не менее 85 кг C/(га год) и оказалось ниже, чем в широколиственно-еловых лесах, где уровень поступления составляет не менее 148 кг C/(га год) ($p < 0.01$). Годовой вынос углерода с подстилочными водами, несмотря на значительную разницу в объемах и концентрациях, сопоставим в этих типах леса: в березово-липовых лесах вынос составил не менее 52 кг C/(га год) за счет высоких объемов, в широколиственно-еловых лесах – не менее 74 кг C/(га год) за счет высоких концентраций. Потоки углерода из нижних минеральных горизонтов сопоставимы в типах леса и составляли не менее 37 кг C/(га год) в березово-липовых лесах и не менее 54 кг C/(га год) в широколиственно-еловых. Стоит отметить, что полученные величины поступления и выноса могут быть и выше в лесах Москворецко-Окской равнины, поскольку летний период 2020 года характеризовался ливневыми дождями, объем которых превышал вместимость коллектора с атмосферными выпадениями (3 л) и объемы потоков воды, прошедшие через почвенный профиль, также превышали вместимость почвенных лизиметров (3 л).

Оценка поглощения углерода в подстилке на основании разницы поступления углерода и его выноса показывает, что имеется тенденция к более высокому поглощению углерода в подстилке в широколиственно-еловых лесах. Различий в поглощении 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 Москворецко-Окской равнины (116 ± 35 кг С/(га год)) по сравнению с лесами Брянского Полесья (56 ± 3 кг С/(га год)). Вынос углерода с подстилочными водами как в лесах Москворецко-Окской равнины на суглинках, так и в лесах Брянского Полесья на песках 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 лесах БП и при варьировании от 48 кг С/(га год) до 98 кг С/(га год) в лесах МО. Потоки углерода из нижних минеральных горизонтов в лесах Москворецко-Окской равнины значительно выше по сравнению с лесами Брянского Полесья и составляли 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 гумидными условиями на объектах Москворецко-Окской равнины.

Оценка поглощения углерода 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. Различий в поглощении углерода в минеральных горизонтах, полученных на основании разницы выноса углерода из подстилки и нижних минеральных горизонтов, не выявлено.

Оценка поступления углерода в лесах с доминированием сосны и ели в среднем в два раза выше по сравнению с лесами, в которых доминировали виды широколиственных деревьев. Вынос углерода с подстилочными водами как в лесах Москворецко-Окской равнины на суглинках, так и в лесах Брянского Полесья на песках, отличался высокой вариабельностью и достигал максимума в лесах с доминированием хвойных, для которых характерна мощная подстилка. Наибольший вынос углерода с почвенными водами характерен для хвойных лесов (Султанбаева и др., 2015), особенно сосновых (Лукина и др., 2018; Fröberg et al., 2011; Ершов, 2021). Оценки выноса потоков РОУ из сосновых лесов умеренного пояса в Бельгии

составляют около 100 кг/га в год (Gielen et al., 2011). По другим оценкам вынос углерода в сосновых лесах Северной Бельгии за период с 2002 по 2012 год составляет 55-61 кг С/(га год) (Verstraeten et al., 2014). В сосновых лесах Брянского Полесья вынос РОУ практически в 5-10 раз меньше (6-12 кг С/(га год)). Такие различия можно объяснить различиями в составе растительности, возрасте и продуктивности лесов, а также в объемах осадков (то есть климатическими условиями). Учитывая широкое распространение сосновых лесов на северо-западе европейской части России - до 20% от покрытой лесом площади (Уткин и др., 2004), суммарный вынос углерода из экосистем с почвенными водами может быть значительным. Оценка выноса для широколиственных лесов на песках значительно меньше, чем в хвойных: в Брянском Полесье вынос составлял 10 кг/га в год, для дубово-буковых лесов Северной Бельгии 19-30 кг С/(га год) (Verstraeten et al., 2014). В хвойно-широколиственных лесах на суглинках оценка выноса РОУ в период с мая 2019 по май 2021 года составляет 37-54 кг С/(га год) в березово-липовых и широколиственно-еловых лесах Москворецко-Окской равнины, для сложных ельников и елово-березовых лесов на правом берегу р.Москвы оценка выноса РОУ в вегетационный период с 2010-2013 гг. достигала 56-71 кг С/га за вегетационный период (Султанбаева., 2015).

ВЫВОДЫ

1. Дана сравнительная оценка поступления органического углерода с атмосферными выпадениями в хвойно-широколиственных лесах разного типа на песчаных и суглинистых почвообразующих породах. В лесах на песках поступление углерода с дождевыми и снеговыми осадками в сосняках кустарничково-зеленомошных и сосняках сложных БП составляло 60 кг С/(га год) и оказалось выше, чем в полидоминантных широколиственных лесах с елью БП, где уровень поступления составляет 47 кг С/(га год). В лесах, формируемых на суглинках, поступление углерода с дождевыми и снеговыми осадками в березово-липовых лесах составляло не менее 85 кг

C/(га год) и оказалось ниже, чем в широколиственно-еловых лесах, где уровень поступления составляет не менее 148 кг C/(га год).

2. Дана сравнительная оценка выноса органического углерода с почвенными водами в хвойно-широколиственных лесах разного типа на песчаных и суглинистых почвообразующих породах. Вынос органического углерода из органогенных горизонтов в полидоминантных широколиственных лесах с елью БП в среднем в 4 раза ниже, чем в сосняках кустарничково-зеленомошных и в 2.5 раза ниже, чем в сосняках сложных. Случаи выноса органического углерода из нижних минеральных горизонтов в лесах БП оказались единичными и варьировали в среднем от 6 до 12 кг C/(га год). Несмотря на значительную разницу в объемах и концентрациях, вынос углерода из подстилки и минерального профиля в лесах МО сопоставим в разных типах леса.

3. Обнаружена более высокая концентрация РОУ в почвенных водах лесов с доминированием хвойных древесных растений, что может быть обусловлено как мощной подстилкой в этих лесах, так и с высоким уровнем поступления РОУ с кроновыми водами.

4. При сравнении регионов исследования более высокое поступление углерода с атмосферными выпадениями отмечено в лесах Москворецко-Окской равнины. Вынос углерода с подстилочными водами как в лесах Москворецко-Окской равнины на суглинках, так и в лесах Брянского Полесья на песках отличался высокой вариабельностью составлял в среднем 44 кг C/(га год) при варьировании от 8 кг C/(га год) до 100 кг C/(га год) в лесах Брянского Полесья и при варьировании от 48 кг C/(га год) до 98 кг C/(га год) в лесах Москворецко-Окской равнины.

5. Потоки углерода из нижних минеральных горизонтов в лесах Москворецко-Окской равнины значительно выше, чем в лесах Брянского Полесья и составляли в среднем 46 и 9 кг C/(га год), соответственно. Значительная разница в поступлении и выносе углерода может быть связана

с более гумидными условиями на объектах Москворецко-Окской равнины при более высоких средних температурах воздуха в Брянском Полесье.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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.

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. При этом, и в тех, и в других лесах самый высокий вклад типа леса в варьирование запасов углерода в минеральном профиле обнаружен в верхнем слое 0–30 см. 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, вероятно, создает благоприятные как топические, так и

трофические условия функционирования почвенной биоты, способствующей накоплению углерода в почвах.

Информативными предикторами изменения запасов углерода в почве оказались видовая насыщенность древесных растений в ярусе трав, которая является интегральным показателем разнообразия всех древесных растений, которые доминируют в современный период и могли доминировать ранее, и 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. Это приводит к уменьшению массы органического горизонта и, соответственно, запасов углерода в нем и к интенсивной миграции соединений углерода в минеральные горизонты почв.

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. Поступление углерода в лесах с доминированием сосны и ели в среднем в два раза выше по сравнению с лесами, в которых доминировали виды широколиственных деревьев. 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 кг C/(га год) до 74 кг C/(га год) и достигал максимума в лесах с доминированием хвойных, для которых характерна мощная подстилка.

Поступление соединений углерода в лесах Москворецко-Окской равнины значительно выше, чем в лесах Брянского Полесья (116 кг C/(га год) и 56 кг C/(га год), соответственно). Вынос соединений углерода из нижних минеральных горизонтов в лесах Москворецко-Окской равнины также

значительно выше и составлял 46 кг С/(га год) против 9 кг С/(га год) в Брянском Полесье. Значительная разница в поступлении и выносе углерода объясняется более высоким объемом осадков на объектах Москворецко-Окской равнины при более высоких средних температурах воздуха в Брянском Полесье.

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. Алябина И.О. Оценка роли почвообразующего потенциала природных факторов в формировании почвенного покрова на основе геоинформационных технологий: дис. ... д.б.н.: 03.02.13: защищена 24.05.16 - М., 2016. - 337 с.
3. Анохина, Н.А. Биогенные углеводороды в почвах парковых зон города Москвы. Автореф. дисс. канд. биол. наук. М.: МГУ, 2020. 25 с.
4. Арчегова, И.Б. Влияние древесных растений на химический состав атмосферных осадков в процессе восстановления среднетаежных лесов / И.Б. Арчегова, Е.Г. Кузнецова // Лесоведение. - 2011. - N 3. - С. 34–43.
5. Баева, Ю.И. Физические свойства и изменение запасов углерода серых лесных почв в ходе постагрогенной эволюции (юг Московской области) / Ю.И. Баева, И.Н. Курганова, А.В. Почикалов, В.Н. Кудеяров // Почвоведение. - 2017. - N. 3. - С. 345–353.
6. Бахмет, О.Н. Запасы углерода в почвах сосновых и еловых лесов Карелии / О.Н. Бахмет // Лесоведение. - 2018. - N. 1. - С. 48-55.
7. Биота экосистем Большого Кавказа / Е.А. Белановская, О.С. Гребенщиков, М.В. Давыдова и др.- М.: Наука, 1990. - 221 с.
8. Бобкова, К.С. Динамика содержания углерода органического вещества в среднетаежных ельниках на автоморфных почвах / К.С. Бобкова, А.В. Машика, А.В. Смагин. - Спб.: Наука, 2014. - 270 с.
9. Гашкина, Н.А. Биогеохимическая миграция элементов в системе "атмосферные осадки–короновые воды–почвенные воды–озеро" в фоновом регионе (Валдайский национальный парк) / Н.А. Гашкина, Т.И. Моисеенко, М.И. Дину, Ю.Г. Таций, Д.Ю. Баранов // Геохимия.- 2020. - Т. 65. - N. 7. - С. 693-710.

10. Гвоздецкий, Н.А. Кавказ. Очерк природы / Н.А. Гвоздецкий. - М.: Географгиз, 1963. - 264 с.
11. Гераськина, А.П. Влияние дождевых червей разных морфо-экологических групп на аккумуляцию углерода в лесных почвах / А.П. Гераськина // Вопросы лесной науки. - 2020. - Т. 3. - N. 2. - С. 1–20.
12. Демаков, Ю.П. Границы и причины variability запасов гумуса в почвах лесов Среднего Поволжья / Ю.П. Демаков, А.В. Исаев, Н.Б. Нуреев, И.И. Митякова // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Лес. Экология. Природопользование. - 2018. - N. 3. - С. 30–49.
13. Дымов А.А. Почвы послерубочных, постпирогенных и постагрогенных лесных экосистем северо-востока европейской части России. Автореф. дисс. канд. биол. наук. М.: МГУ, 2018. 46 с.
14. Евстигнеев, О.И. Неруссо-Деснянское полесье: история природопользования / О.И. Евстигнеев. - Брянск: Группа компаний «Десяточка», 2009. - 139 с.
15. Евстигнеев О.И. 2010. Механизмы поддержания биологического разнообразия лесных биогеоценозов. дис. ... д.б.н.: Нижний Новгород, 519 с.
16. Ершов, В.В. Оценка динамики состава почвенных вод северотаежных лесов при снижении аэротехногенного загрязнения выбросами медно-никелевого комбината / В.В. Ершов, Н.В. Лукина, М.А. Орлова, Л.Г. Исаева, В.Э. Смирнов, Т.Т. Горбачева // Сибирский экологический журнал. - 2019. - Т. 26. - N. 1. - С. 119–132
17. Ершов, В.В. Мониторинг состава атмосферы и почвенных вод в лесных экосистемах: основные этапы и перспективы / В.В. Ершов // Вопросы лесной науки. - 2021. - Т. 4. - N. 1. - С. 1–34.
18. Ершов В.В. Фитогенное варьирование состава атмосферных выпадений и почвенных вод северотаежных лесов в условиях аэротехногенного загрязнения Дисс. ... канд. биол. н.: 01.05.15. Апатиты. 2021. 188 с.

19. Ценофонд лесов Европейской России [Электронный ресурс]. - <http://cepl.rssi.ru/bio/flora/main.htm> (дата обращения 15.03.2022)
20. Зонн, С.В. Горно-лесные почвы северо-западного Кавказа / С.В. Зонн. - Л.: Изд-во АН СССР, 1950. - с. 55–145.
21. Караванова, Е.И. Взаимодействие водорастворимых органических веществ хвойной подстилки с минералами и горизонтами подзолистой почвы и подзолов / Е.И. Караванова, Д.Ф. Золовкина, А.А. Степанов // Почвоведение. - 2020. - N. 9. - С. 1071–1084.
22. Карелин, Д.В. Эффект усиления эмиссии CO₂ в окнах распада лесов Валдая / Д.В. Карелин, А.В. Почикалов, Д.Г. Замолодчиков // Известия Российской академии наук. Серия географическая. - 2017. - N. 2. - С. 60–68.
23. Карпачевский, Л.О. Пестрота почвенного покрова в лесном биогеоценозе / Л.О. Карпачевский. - М.: Изд-во моск. ун-та, 1977. - 312 с.
24. Классификация и диагностика почв России / Сост. Л.Л. Шишов, В.Д. Тонконогов, И.И. Лебедева, М.И. Герасимова. - Смоленск: Ойкумена, 2004. - 342 с.
25. Ковалев, И.В. Пул лигниновых фенолов в почвах лесных экосистем / И.В. Ковалев, Н.О. Ковалева // Лесоведение. - 2016. - N. 2. - С. 148–160.
26. Когут, Б.М. Оценка насыщенности почвы органическим углеродом / Б.М. Когут, В.М. Семенов // Бюллетень Почвенного института им. В. В. Докучаева. - 2020. - N. 102. - С. 103–124.
27. Кузнецова, А.И. Аккумуляция углерода в песчаных и суглинистых почвах равнинных хвойно-широколиственных лесов в ходе восстановительных сукцессий / А.И. Кузнецова, Н.В. Лукина, Е.В. Тихонова, А.В. Горнов, М.В. Горнова, В.Э. Смирнов, А.П. Гераськина, Н.Е. Шевченко, Д.Н. Тебенькова, С.И. Чумаченко // Почвоведение. - 2019. - N. 7. - С. 803–816.
28. Кузнецова, А.И. Запасы углерода в песчаных почвах сосновых лесов на западе России / А.И. Кузнецова, Н.В. Лукина, А.В. Горнов, М.В.

Горнова, Е.В. Тихонова, В.Э. Смирнов, М.А. Данилова, Д.Н. Тебенькова, Т.Ю. Браславская, В.А. Кузнецов, Ю.Н. Ткаченко, Н.В. Геникова // Почвоведение. - 2020. - N. 8. - С. 959–969.

29. Ландшафты Московской области и их современное состояние / Под ред. И.И. Мамай. - Смоленск: Изд-во Смол. гуманитар. ун-та, 1997. - 296 с.

30. Лукина, Н.В. Оценка состава почвенных вод северо-таежных хвойных лесов фоновых территорий индустриально развитого региона / Н.В. Лукина, Ершов В.В., Т.Т. Горбачева, М.А. Орлова (М.А. Данилова), Л.Г. Исаева, Д.Н. Тебенькова // Почвоведение. - 2018. - N. 3. - С. 284–296.

31. Лукина, Н.В., Никонов, В.В. Питательный режим лесов северной тайги: природные и техногенные аспекты / Н.В. Лукина, В.В. Никонов. - Апатиты: Изд-во Кольского научного центра РАН, 1998. - 316 с.

32. Лукина, Н.В. Функциональная классификация лесов: актуальность и подходы к разработке / Н.В. Лукина, А.П. Гераськина, А.И. Кузнецова, В.Э. Смирнов, А.В. Горнов, Н.Е.Шевченко, Е.В.Тихонова, Д.Н. Тебенькова, Е.В. Басова // Лесоведение. - 2021. - N. 6. - С. 566-580.

33. Маевский, П.Ф. Флора средней полосы европейской части России. 11-е издание. / П.Ф. Маевский. - М.: Товарищество научных изданий КМК, 2014. - 635 с.

34. Мажитова, Г.Г. Геоинформационная система для бассейна р. Усы (Республика Коми) и расчет запасов почвенного углерода / Г.Г. Мажитова, В.Г. Казаков, Е.В. Лопатин, Т. Виртанен // Почвоведение. - 2003. - N. 2. - С. 133-144.

35. Машика А.В. Динамика содержания органического углерода в почвах еловых лесов подзоны средней тайги : дис. – Автореф. дисс. канд. биол. наук. М.: Институт лесоведения РАН, 2005, 2005. 24 стр.

36. Мильков, Ф.Н., Гвоздецкий, Н.А. Физическая география СССР. Общий обзор. Европейская часть СССР. Кавказ: Учебник для студентов. 5-е изд. / Ф.Н. Мильков, Н.А. Гвоздецкий. - М.: Высшая школа, 1986. - 376 с.

37. Миркин, Б.М., Словарь понятий и терминов современной фитоценологии / Б.М. Миркин, Г.С. Розенберг, Л.Г. Наумова. - М.: Наука, 1989. 223 с.
38. Морозова, О.В. Неморальнотравные ельники Европейской России / О.В. Морозова, Ю.А. Семенищенков, Е.В. Тихонова, Н.Г. Беляева, М.В. Кожевникова, Т.В. Черненкова // Растительность России. - 2017. - N.31. - С. 33–58.
39. Морозова, О.В. Дифференциация лесных сообществ юго-западной части Московской области / О.В. Морозова, Е.В. Тихонова // Известия Самарского НЦ РАН. - 2012. - Т. 14. - N. 1(4). - С. 1073–1076.
40. Мучник, Е.Э. Валуевский лесопарк как перспективная особо охраняемая природная территория в пределах Новой Москвы / Е.Э. Мучник, Е.В. Тихонова, И.М. Аверченков, И.Ю. Неслуховский, А.Ю. Захаринский, А.В. Комаров, М.Н. Кожин, М.В. Семенцова // Труды Карельского научного центра Российской академии наук. - 2020. - N. 8. - С. 90–103.
41. Орлова, М.А. Влияние ели на кислотность и содержание элементов питания в почвах северотаежных ельников кустарничково-зеленомошных / М.А. Орлова, Н.В. Лукина, В.Э. Смирнов, Н.А. Артемкина // Почвоведение. - 2016. - N. 11. - С. 1355–1367.
42. Подвезенная, М.А. Зависимость вариабельности запасов углерода в почве от пространственной структуры растительного покрова лесных биогеоценозов / М.А. Подвезенная, И.М. Рыжова // Вестник Московского университета. Серия 17. Почвоведение. - 2010. - N. 4. - С. 3–9.
43. Приказ госкомлеса СССР от 28.02.1989 №38 «Общесоюзные нормативы для таксации лесов». URL: <http://base.garant.ru/70811050/> (дата обращения 01.07.2021)
44. Приказ Федеральной службы лесного хозяйства России от 19.01.1995 №10 «Об утверждении Справочника лесотаксационных нормативов для Северного Кавказа» URL: <https://docs.cntd.ru/document/9017116>. (дата обращения 01.07.2021).

45. Припутина, И.В. Распределение органического вещества и азота в дерново-подбурах Приокско-Тerrasного заповедника и его связь со структурой лесных фитоценозов / И.В. Припутина, Г.Г. Фролова, В.Н. Шанин, Т.Н. Мякшина, П.Я. Грабарник // Почвоведение. - 2020. - N. 8. - С. 921–933.
46. Пристова, Т.А. Химический состав атмосферных осадков и лизиметрических вод подзола иллювиально-железистого под хвойно-лиственными насаждениями (Республика Коми) / Т.А. Пристова, И.В. Забоева // Почвоведение. - 2007. - N. 12. - С. 1472-1481.
47. Распоряжение Министерства природных ресурсов и экологии РФ от 30 июня 2017 г. № 20-р «О методических указаниях по количественному определению объема поглощения парниковых газов» URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71612096/> (дата обращения 01.07.2021).
48. Рассеянные элементы в бореальных лесах / Отв. ред. А.С. Исаев. - М.: Наука, 2004. – 616 с.
49. Рыжова, И.М. Динамика свойств почв и структуры запасов углерода в постагрогенных экосистемах в процессе естественного лесовосстановления / И.М. Рыжова, В.М. Телеснина, А.А. Ситникова // Почвоведение. - 2020. - N. 2. - С. 230-243.
50. Семенов, В.М. Стабилизация органического вещества в почве / В.М. Семенов, Л.А. Иванникова, А.С. Тулина // Агрoхимия. - 2009. - N. 10. - С. 77–96.
51. Семенов, В.М. Почвенное органическое вещество / В.М. Семенов, Б.М. Когут, А.Л. Степанов, А.Г. Мамонтов. - М. ГЕОС, 2015. - 233 с.
52. Семенюк, О.В. Использование особенностей структурно-функциональной организации подстилок для оценки интенсивности круговорота в городских насаждениях (на примере Москвы) / О.В. Семенюк,

В.М. Телеснина, Л.Г. Богатырев, А.И. Бенедиктова // Почвоведение. - 2021. - N. 5. - С. 592-605.

53. Смирнова, О.В. Осока волосистая / О.В. Смирнова // Биологическая флора Московской области. М.: Изд-во МГУ. - 1980. - N. 6. - С. 66-74.

54. Стриганова, Б.Р. Питание почвенных сапрофагов. Глава 1 / Б.Р. Стриганова. - М.: Наука, 1980. с. 8–15.

55. Султанбаева, Р.Р. Поступление и миграция растворимого органического углерода в почвах лесных экосистем подзоны широколиственно-хвойных лесов / Р.Р. Султанбаева, Г.Н. Копчик, И.Е. Смирнова, С.В. Копчик // Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение. - 2015. - N. 4. - С. 37-42.

56. Тебенькова, Д.Н. Мультифункциональность и биоразнообразие лесных экосистем / Д.Н. Тебенькова, Н.В. Лукина, М.А. Данилова, А.И. Кузнецова, А.В. Горнов, Н.Е. Шевченко, А.Д. Катаев, Ю.Н. Гагарин, С.И. Чумаченко // Лесоведение. - 2019. - N. 5. - С. 341-356.

57. Телеснина, В.М. Динамика свойств почв и состава растительности в ходе постагрогенного развития в разных биоклиматических зонах / В.М. Телеснина, И.Н. Курганова, Л.А. Овсепян, В.И. Личко, А.М. Ермолаев, Д.М. Мирин // Почвоведение. - 2017. - N. 12. - С. 1514-1534.

58. Теория и практика химического анализа почв / Л.А. Воробьева, О.В. Лопухина, И.А. Салпагарова и др. – М.:ГЕОС, 2006. – 400 с.

59. Тихонова, Е.В. Мозаичность фитоценозов хвойно-широколиственных лесов валуевского лесопарка / Е.В. Тихонова, Г.Н. Тихонов // Вопросы лесной науки. - 2021. - Т.4. - N.3. - С. 52-87.

60. Уткин, А.И. Биологическая продуктивность лесов (методы изучения и результаты) / А.И. Уткин // Лесоведение и лесоводство. Т. 1. - Москва: ВИНТИ, 1975. с. 9–190.

61. Уткин А.И. Пулы углерода фитомассы и почв сосновых лесов России / А.И. Уткин, Д.Г. Замолодчиков, О.В. Честных // Хвойные бореальной зоны. - 2004. - Т. 22. - N. 1–2.
62. Чернова, О.В. Комплексный подход к картографической оценке запасов органического углерода в почвах России / О.В. Чернова, О.М. Голозубов, И.О. Алябина, Д.Г. Щепашенко // Почвоведение. - 2021. - N. 3. - С. 273-286.
63. Чернова, О.В. Оценка запасов органического углерода лесных почв в региональном масштабе / О.В. Чернова, И.М. Рыжова, М.А. Подвезенная // Почвоведение. - 2020. - N. 3. - С. 340–350.
64. Честных, О.В. Общие запасы биологического углерода и азота в почвах лесного фонда России / О.В. Честных, Д.Г. Замолодчиков, А.И. Уткин // Лесоведение. - 2004. - N. 4. - С. 30-42.
65. Честных, О.В. Углерод почв лесных районов Европейско-Уральской части России / О.В. Честных, В.И. Грабовский, Д.Г. Замолодчиков // Вопросы лесной науки. - 2020. - Т. 3. - N. 2. - С. 1–15.
66. Честных, О.В. Запасы углерода в подстилках лесов России / О.В. Честных, В.А. Лыжин, А.В. Кокшарова // Лесоведение. - 2007. - N. 6. - С. 114–121.
67. Шаблий И.В. Формирование дубово-сосновых насаждений в условиях свежих судубрав Южной части Полесья и Северной лесостепи. Автореф. дисс. канд. биол. наук. Киев: Укр. с.-х. акад., 1990. 25 с.
68. Шильцова, Г.В. Влияние полога соснового и березового леса на химический состав осадков в заповеднике «Кивач» / Г.В. Шильцова, В.Г. Ласточкина // Тр. Карельского научного центра РАН. - 2006. - N. 10. - С. 180-184
69. Щепашенко, Д.Г. Запасы органического углерода в почвах России / Д.Г. Щепашенко, Л.В. Мухортова, А.З. Швиденко, Э.Ф. Ведрова // Почвоведение. - 2013. - N. 2. - С. 123–123.

70. Albrektson, A. Needle litterfall in stands of *Pinus sylvestris* L. in Sweden, in relation to site quality, stand age and latitude / A. Albrektson // Scandinavian Journal of Forest Research. - 1988. - Vol. 3. - N. 1-4. - P. 333–342.
71. Amelung, W. Amino sugars in native grassland soils along a climosequence in North America / W. Amelung, X. Zhang, K.W. Flach, W. Zech // Soil Science Society of America Journal. - 1999. - Vol. 63. - N. 1. - P. 86–92.
72. Amundson, R. The carbon budget in soils / R. Amundson // Annual Review of Earth and Planetary Sciences. - 2001. - Vol. 29. - N. 1. - P. 535–562.
73. Angst, G. Tracing the sources and spatial distribution of organic carbon in subsoils using a multi-biomarker approach / G. Angst, S. John, C.W. Mueller, I. Kögel-Knabner, J. Rethemeyer // Scientific reports. - 2016. - Vol. 6. - N. 1. - P. 1–12.
74. Angst, G. Aggregation controls the stability of lignin and lipids in clay-sized particulate and mineral associated organic matter / G. Angst, K.E. Mueller, I. Kögel-Knabner, K.H. Freeman, C.W. Mueller // Biogeochemistry. - 2017. - Vol. 132. - N. 3. - P. 307–324.
75. Angst, G. Plant-or microbial-derived? A review on the molecular composition of stabilized soil organic matter / G. Angst, K.E. Mueller, K.G. Nierop, M.J. Simpson // Soil Biology and Biochemistry. - 2021. - Vol. 156. - N. 1-3. - P. 108–189.
76. Bakhshandeh-Navroud, B. The interactions between tree-herb layer diversity and soil properties in the oriental beech (*Fagus orientalis* Lipsky) stands in Hyrcanian forest / B. Bakhshandeh-Navroud, K. Abrari Vajari, B. Pilehvar, Y. Kooch // Environmental Monitoring and Assessment. - 2018. - Vol. 190. - P. 425.
77. Balabane, M. Aggregation and carbon storage in silty soil using physical fractionation techniques / M. Balabane, A.F. Plante // European Journal of Soil Science. - Vol.55. - N.2. - 2004. - P.415–427.
78. Bardgett R. The biology of soil: a community and ecosystem approach. Oxford university press, 2005. 256 p.

79. Berg, B. Litter decomposition and organic matter turnover in northern forest soils / B. Berg // *Forest ecology and Management*. - 2000. - Vol. 133. - N. 1-2. P.13–22.
80. Berg, B. Litter mass loss rates in pine forests of Europe and Eastern United States: some relationships with climate and litter quality / B. Berg, M.P. Berg, P. Bottner, E. Box, A. Breymeyer, R.C. De Anta, A.V. de Santo // *Biogeochemistry*. - 1993. - Vol. 20. - N. 3. - P. 127–159.
81. Berg, B. McClaugherty, C. *Plant Litter*. 4th ed. Switzerland, Cham: Springer, 2020. 332 p.
82. Blume H.-P., Fleige H., Horn R., Kandeler E., Kogel-Knabner I., Kretschmar R., Stahr K., Wilke B.-M. *Soil Science*, first ed. Berlin Heidelberg: Springer, 2015. 630 p.
83. Brassard, B.W. Differences in fine root productivity between mixed- and single-species stands / B.W. Brassard, H.Y. Chen, Y. Bergeron, D. Paré // *Functional Ecology*. - 2011. - Vol. 25. - N. 1. - P. 238–246.
84. Brassard, B.W. Tree species diversity increases fine root productivity through increased soil volume filling / B.W. Brassard, H.Y. Chen, X. Cavard, J. Laganière, P.B. Reich, Y. Bergeron, Z. Yuan // *Journal of Ecology*. - 2013. - Vol. 101. - N. 1. - P. 210–219.
85. Bruckman, D. Pollination of a native plant changes with distance and density of invasive plants in a simulated biological invasion / D. Bruckman, D.R. Campbell // *American journal of botany*. - 2016. - Vol. 103. - N. 8. - P. 1458–1465.
86. Brussaard, L. Biodiversity and ecosystem functioning in soil / L. Brussaard // *Ambio*. - 1997. - P. 563–570.
87. Bull, I.D. Organic geochemical studies of soils from the Rothamsted classical experiments—V. The fate of lipids in different long-term experiments / I.D. Bull, P.F. van Bergen, C.J. Nott, P.R. Poulton, R.P. Evershed // *Organic geochemistry*. - 2000. - Vol. 31. - N. 5. - P. 389–408.

88. Cadisch, G. Driven by nature plant litter quality and decomposition / G. Cadisch, K.E. Giller // Wallingford, Oxon, UK: CAB International, 1997. 409 p.
89. Canessa, R. Relative effects of climate and litter traits on decomposition change with time, climate and trait variability / R. Canessa, L. van den Brink, A. Saldaña, R.S. Rios, S. Hättenschwiler, C.W. Mueller, M.Y. Bader // *Journal of Ecology*. - 2021. - Vol. 109. - N. 1. - P. 447–458.
90. Carreiro, M.M. Microbial enzyme shifts explain litter decay responses to simulated nitrogen deposition / M.M. Carreiro, R.L. Sinsabaugh, D.A. Repert, D.F. Parkhurst // *Ecology*. - 2000. - Vol. 81. - N. 9. - P. 2359–2365.
91. Carrington, E.M. Biochemical changes across a carbon saturation gradient: lignin, cutin, and suberin decomposition and stabilization in fractionated carbon pools / E.M. Carrington, P.J. Hernes, R.Y. Dyda, A.F. Plante, J. Six // *Soil Biology and Biochemistry*. - 2012. - Vol. 47. - P. 179–190.
92. Castellano, M.J. Integrating plant litter quality, soil organic matter stabilization, and the carbon saturation concept / M.J. Castellano, K.E. Mueller, D.C. Olk, J.E. Sawyer, J. Six // *Global change biology*. - 2015. - Vol. 21. - N. 9. - P. 3200–3209.
93. Chen, H.Y.H. The contribution of litterfall to net primary production during secondary succession in the boreal forest / H.Y.H. Chen, A.N. Brant, M. Seedre, B.W. Brassard, A.R. Taylor // *Ecosystems*. - 2017. - Vol. 20. - N. 4. - P. 830–844.
94. Chevan, A Hierarchical Partitioning / A. Chevan, M. Sutherland // *The American Statistician*. - 1991. - Vol. 45. - P. 90–96.
95. Clarke N., Zlindra 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 pp. Part XIV. In: 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.

96. Clemente, J.S. Physical protection of lignin by organic matter and clay minerals from chemical oxidation / J.S. Clemente, M.J. Simpson // *Organic geochemistry*. - 2013. - Vol. 58. - P. 1–12.
97. Córdova, S.C. Plant litter quality affects the accumulation rate, composition, and stability of mineral-associated soil organic matter / S.C. Córdova, D.C. Oik, R.N. Dietzel, K.E. Mueller, S.V. Archontouilis, M.J. Castellano // *Soil Biology and Biochemistry*. - 2018. - Vol. 125. - P. 115–124.
98. Cornelissen, J.H. Comparative cryptogam ecology: A review of bryophyte and lichen traits that drive biogeochemistry / J.H. Cornelissen, S.I. Lang, N.A. Soudzilovskaia, H.J. During // *Annals of Botany*. - Vol.99. - 2007. - P.987–1001.
99. Cornwell, W.K. Plant species traits are the predominant control on litter decomposition rates within biomes worldwide / W.K. Cornwell, J.H. Cornelissen, K. Amatangelo, E. Dorrepaal, V.T. Eviner, O. Godoy, H.M. Quested // *Ecology letters*. - 2008. - Vol.11. - N.10. - P.1065–1071.
100. Cotrufo, M.F. The microbial efficiency-M matrix stabilization (MEMS) framework integrates plant litter decomposition with soil organic matter stabilization: do labile plant inputs form stable soil organic matter? / M.F. Cotrufo, M.D. Wallenstein, C.M. Boot, K. Deneff, E. Paul // *Global change biology*. - 2013. - Vol. 19. - N. 4. - P. 988–995.
101. Cusack, D.F. L. Team. Controls on long-term root and leaf litter decomposition in neotropical forests / D.F. Cusack, W.W. Chou, W.H. Yang, M.E. Harmon, W.L. Silver // *Global Change Biology*. - 2009. - Vol. 15. - N. 5. - P. 1339–1355.
102. Dawud, S.M. Is tree species diversity or species identity the more important driver of soil carbon stocks, C/N ratio, and pH? / S.M. Dawud, K. Raulund-Rasmussen, T. Domisch, L. Finér, B. Jaroszewicz, L. Vesterdal // *Ecosystems*. - 2016. - Vol. 19. - N. 4. - P. 645–660.

103. Diaz, S. Evidence of a feedback mechanism limiting plant response to elevated carbon dioxide / S. Diaz, J.P. Grime, J. Harris, E. McPherson // *Nature*. - 1993. - Vol. 364. - N. 6438. - P. 616–617.
104. Dijkstra, F.A. Interactions between soil and tree roots accelerate long-term soil carbon decomposition / F.A. Dijkstra, W. Cheng // *Ecology Letters*. - 2007. - Vol. 10. - N. 11. - P. 1046–1053.
105. Dijkstra, F.A. Aluminum solubility and mobility in relation to organic carbon in surface soils affected by six tree species of the northeastern United States / F.A. Dijkstra, R.D. Fitzhugh // *Geoderma*. - 2003. - Vol. 114. - N. 1-2. - P. 33–47.
106. Dungait, J.A.J. Soil organic matter turnover is governed by accessibility not recalcitrance / J.A.J. Dungait, D.W. Hopkins, A.S. Gregory, A.P. Whitmore // *Global Change Biology*. - 2012. - Vol. 18. - N. 6. - P. 1781–1796.
107. Dyer, M.L. Apparent controls of mass loss rate of leaf litter on a regional scale: litter quality vs. climate / M.L. Dyer, V. Meentemeyer, B. Berg // *Scandinavian Journal of Forest Research*. - 1990. - Vol. 5. - N. 1-4. - P. 311–323.
108. Feng, X. Chemical and mineralogical controls on humic acid sorption to clay mineral surfaces / X. Feng, A.J. Simpson, M.J. Simpson // *Organic Geochemistry*. - 2005. - Vol. 36. - P. 1553–1566.
109. Feng, X. The distribution and degradation of biomarkers in Alberta grassland soil profiles / X. Feng, M.J. Simpson // *Organic Geochemistry*. - 2007. - Vol. 38. - N. 9. - P. 1558–1570.
110. Finzi, A.C. Canopy tree–soil interactions within temperate forests: species effects on soil carbon and nitrogen / A.C. Finzi, N. Van Breemen, C.D. Canham // *Ecological applications*. - 1998. - Vol. 8. - N. 2. - P. 440–446.
111. Fox, O. Soil fauna modifies the recalcitrance-persistence relationship of soil carbon pools / O. Fox, S. Vetter, K. Ekschmitt, V. Wolters // *Soil Biology and Biochemistry*. - 2006. - Vol. 38. - N. 6. - P. 1353–1363.
112. Framstad, E. Biodiversity, carbon storage and dynamics of old northern forest / E. Framstad, H. de Wit, R. Mäkipää, M. Larjavaara, L. Vesterdal,

E. Karlton // TemaNord. - Vol. 2013:507. - Nordic Council of Ministers. - 2013. - 130 p.

113. Fröberg, M. Dissolved organic carbon and nitrogen leaching from Scots pine, Norway spruce and silver birch stands in southern Sweden / M. Fröberg, K. Hansson, D.B. Kleja, Gh. Alavi // Forest ecology and management. - 2011. - Vol. 262. - N. 9. - P. 1742-1747.

114. Frouz, J. Effects of soil macro-and mesofauna on litter decomposition and soil organic matter stabilization / J. Frouz // Geoderma. - 2018. - Vol. 332. - P. 161–172.

115. Frouz, J. Is the effect of trees on soil properties mediated by soil fauna? A case study from post-mining sites / J. Frouz, M. Livečková, J. Albrechtová, A. Chroňáková, T. Cajthaml, V. Pižl, L. Háněl, J. Starý, P. Baldrian, Z. Lhotáková // Forest Ecology and Management. - 2013. - Vol. 309. - P. 87–95.

116. Fujisaki, K. Data synthesis of carbon distribution in particle size fractions of tropical soils: Implications for soil carbon storage potential in croplands / K. Fujisaki, L. Chapuis-Lardy, A. Albrecht, T. Razafimbelo, J.L. Chotte, T. Chevallier // Geoderma. - 2018. - Vol. 313. - P. 41–51.

117. Gebauer T. Water turnover in species-rich and species-poor deciduous forests: xylem sap flow and canopy transpiration. PhD thesis. Göttingen: university of Göttingen. 2010. 128 p.

118. Gentile, R. Litter quality impacts short-but not long-term soil carbon dynamics in soil aggregate fractions / R. Gentile, B. Vanlauwe, J. Six // Ecological Applications. - 2011. - Vol. 21. - N. 3. - P. 695–703.

119. Gielen, B. The importance of dissolved organic carbon fluxes for the carbon balance of a temperate Scots pine forest / B. Gielen, J. Neiryneck, S. Luysaert, I.A. Janssens // Agricultural and Forest Meteorology. - 2011. - Vol. 151. - N. 3. - P. 270-278.

120. Gill, R.A. Global patterns of root turnover for terrestrial ecosystems / R.A. Gill, R.B. Jackson // The New Phytologist. - 2000. - Vol. 147. - N. 1. - P. 13–31.

121. Gleixner, G. Soil organic matter dynamics: a biological perspective derived from the use of compound-specific isotopes studies / G. Gleixner // *Ecological Research*. - 2013. - Vol. 28. - N. 5. P. 683–695.
122. Gmach, M.R. Soil dissolved organic carbon responses to sugarcane straw removal / M.R. Gmach, K. Kaiser, M.R. Cherubin, C.E.P. Cerri, I.P. Lisboa, A.L.S. Vasconcelos, M. Siqueira-Neto // *Soil Use and Management*. - 2020. - Vol. 37. - N. 1. - P. 126–137.
123. Gower, S.T. Differences in soil and leaf litterfall nitrogen dynamics for five forest plantations / S.T. Gower, Y. Son // *Soil Science Society of America Journal*. - 1992. - Vol. 56. - N. 6. - P. 1959–1966.
124. Grandy, A.S. Molecular C dynamics downstream: the biochemical decomposition sequence and its impact on soil organic matter structure and function / A.S. Grandy, J.C. Neff // *Science of the Total Environment*. - 2008. - Vol. 404. - N. 2-3. - P. 297–307.
125. Gunina, A. Sugars in soil and sweets for microorganisms: Review of origin, content, composition and fate / A. Gunina, Y. Kuzyakov // *Soil Biology and Biochemistry*. - 2015. - Vol. 90. - P. 87–100.
126. Gunina, A. Effect of plant communities on aggregate composition and organic matter stabilisation in young soils / A. Gunina, I. Ryzhova, M. Dorodnikov, Y. Kuzyakov // *Plant and Soil*. - 2015. - Vol. 387. - N. 1. - P. 265–275.
127. Hagedorn, F. Increased N deposition retards mineralization of old soil organic matter / F. Hagedorn, D. Spinnler, R. Siegwolf // *Soil Biology and Biochemistry*. - 2003. - Vol. 35. - N. 12. - P. 1683–1692.
128. Hagen-Thorn, A. The impact of six European tree species on the chemistry of mineral topsoil in forest plantations on former agricultural land / A. Hagen-Thorn, I. Callesen, K. Armolaitis, B. Nihlgård // *Forest ecology and management*. - 2004. - Vol. 195. - N. 3. - P. 373–384.
129. Halonen O. Nutrient analysis methods / O. Halonen, H. Tulkki, J. Derome // *Metsantutkimuslaitoksen tiedonantoja*. - 1983. - Vol.121. - P. 1-28.

130. Heim, A. Early stage litter decomposition rates for Swiss forests / A. Heim, B. Frey // *Biogeochemistry*. - 2004. - Vol. 70. - N. 3. - P. 299–313.
131. Hilli S. Significance of litter production of forest stands and ground vegetation in the formation of organic matter and storage of carbon in boreal coniferous forests [in:] *Forest condition monitoring in Finland – National report* (Eds. P. Merilä, S. Jortikka). The Finnish Forest Research Institute, 2013. URL: <https://clck.ru/agP2L> (November 21, 2021).
132. Hobbie, S.E. Temperature and plant species control over litter decomposition in Alaskan tundra / S.E. Hobbie // *Ecological monographs*. - 1996. - Vol. 66. - N. 4. - P. 503–522.
133. Global climate and weather data Available online: <https://worldclim.org/> (accessed on 28 August 2021)
134. Huang, W. Earthworm abundance and functional group diversity regulate plant litter decay and soil organic carbon level: A global meta-analysis / W. Huang, G. Gonzalez, X. Zou // *Applied Soil Ecology*. - 2020. - Vol. 150. - P. 1–15.
135. Huang, Y. Positive effects of tree species diversity on litterfall quantity and quality along a secondary successional chronosequence in a subtropical forest / Y. Huang, , Y. Ma, K. Zhao, P.A. Niklaus, B. Schmid, J.S. He // *Journal of Plant Ecology*. - 2017. - Vol. 10. - N. 1. - P. 28–35.
136. Husson, F., Le, S.; Pagès, J. *Exploratory Multivariate Analysis by Example Using R*, 2nd ed; Chapman and Hall/CRC: New York, USA, 2017.
137. Joly, F.X. Tree species diversity affects decomposition through modified micro-environmental conditions across European forests / F.X. Joly, A. Milcu, M. Scherer-Lorenzen, L.K. Jean, F. Bussotti, S.M. Dawud, S. Hättenschwiler // *New Phytologist*. - 2017. - Vol. 214. - N. 3. - P. 1281–1293.
138. Kaiser, K. Changes in dissolved lignin-derived phenols, neutral sugars, uronic acids, and amino sugars with depth in forested Haplic Arenosols and Rendzic Leptosols / K. Kaiser, G. Guggenberger, L. Haumaier // *Biogeochemistry*. - 2004. - Vol. 70. - N. 1. - P. 135–151.

139. Kaiser, K. Dissolved organic matter sorption by mineral constituents of subsoil clay fractions / K. Kaiser, W. Zech // *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. - 2000. - Vol. 163. - N. 5. - P. 531–535.
140. Kalbitz, K. Controls on the dynamics of dissolved organic matter in soils: a review / K. Kalbitz, S. Solinger, J.H. Park, B. Michalzik, E. Matzner // *Soil science*. - 2000. - Vol. 165. - N. 4. - P. 277–304.
141. Kalbitz, K. Contribution of dissolved organic matter to carbon storage in forest mineral soils / K. Kalbitz, K. Kaiser // *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. - 2008. - Vol. 171. - P. 52–60.
142. Kalbitz, K. Lignin degradation controls the production of dissolved organic matter in decomposing foliar litter / K. Kalbitz, K. Kaiser, J. Bargholz, P. Dardenne // *European Journal of Soil Science*. - 2006. - Vol. 57. - N. 4. - P. 504–516.
143. Kiem, R. Contribution of lignin and polysaccharides to the refractory carbon pool in C-depleted arable soils / R. Kiem, I. Kögel-Knabner // *Soil Biology and Biochemistry*. - 2003. - Vol. 35. - N. 1. - P. 101–118.
144. Knorr, M. Nitrogen additions and litter decomposition: A meta-analysis / M. Knorr, S.D. Frey, P.S. Curtis // *Ecology*. - 2005. - Vol. 86. - N. 12. - P. 3252–3257.
145. Krishna, M.P. Litter decomposition in forest ecosystems: a review / M.P. Krishna, M. Mohan // *Energy, Ecology and Environment*. - Vol. 2. - N. 4. - 2017. - P. 236-249.
146. Kuznetsova, A.I. Linking Vegetation, Soil Carbon Stocks, and Earthworms in Upland Coniferous–Broadleaf Forests / A.I. Kuznetsova, A.P. Geraskina, N.V. Lukina, V.E. Smirnov, E.V. Tikhonova, N.E. Shevchenko, A.V. Gornov, E.V. Ruchinskaya, D.N. Tebenkova // *Forests*. - 2021. - Vol. 12. - Article 1179.
147. Kuzyakov, Y. Carbon input by plants into the soil. Review / Y. Kuzyakov, G. Domanski // *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. - 2000. - Vol. 163. - N. 4. - P. 421–431.

148. Lal, R. Carbon sequestration in temperate forests / R. Lal, K. Lorenz // [in:] *Recarbonization of the Biosphere*. Dordrecht: Springer, 2012. - P. 187–201.
149. Langenbruch, C. Effects of beech (*Fagus sylvatica*), ash (*Fraxinus excelsior*) and lime (*Tilia spec.*) on soil chemical properties in a mixed deciduous forest / C. Langenbruch, M. Helfrich, H. Flessa // *Plant and Soil*. - 2012. - Vol. 352. - N. 1. - P. 389–403.
150. Lauenroth, W.K. Turnover of root systems / W.K. Lauenroth, R. Gill // [in:] *Root ecology*. Berlin: Springer, 2003. - P. 61–89.
151. Le, S. FactoMineR: An R package for multivariate analysis. / S. Le, J. Josse, F. Husson // *Journal of Statistical Software*. - 2008. - Vol. 25. - N. 1.
152. Lehmann, J. The contentious nature of soil organic matter / J. Lehmann, M. Kleber // *Nature*. - 2015. - Vol. 528. - N. 7580. - P. 60–68.
153. Lei, P. The effect of tree species diversity on fine-root production in a young temperate forest / P. Lei, M. Scherer-Lorenzen, J. Bauhus // *Oecologia*. - 2012. - Vol. 169. - N. 4. - P. 1105–1115.
154. Leskinen, P. Russian forests and climate change. What Science Can Tell Us 11. / P. Leskinen, M. Lindner, P.J. Verkerk, G.J. Nabuurs, J. Van Brusselen, E. Kulikova, M. Hasegawa, B. Lerink // *European Forest Institute: Joensuu, Finland, 2020*.
155. Liang, C. The importance of anabolism in microbial control over soil carbon storage / C. Liang, J.P. Schimel, J.D. Jastrow // *Nature microbiology*. - 2017. - Vol. 2. - N. 8. - P. 1–6.
156. Lovett, G.M. Nitrogen cycling in a northern hardwood forest: do species matter? / G.M. Lovett, K.C. Weathers, M.A. Arthur, J.C. Schultz // *Biogeochemistry*. - 2004. - Vol. 67. - N. 3. - P. 289–308.
157. Ludwig, M. Microbial contribution to SOM quantity and quality in density fractions of temperate arable soils / M. Ludwig, J. Achtenhagen, A. Miltner, K.U. Eckhardt, P. Leinweber, C. Emmerling, S. Thiele-Bruhn // *Soil Biology and Biochemistry*. - 2015. - Vol. 81. - P. 311–322.

158. Lukina, N. Linking Forest Vegetation and Soil Carbon Stock in Northwestern Russia / N. Lukina, A. Kuznetsova, E. Tikhonova, V. Smirnov, M. Danilova, A. Gornov, O. Bakhmet, A. Kryshen, D. Tebenkova, M. Shashkov, S. Knyazeva // *Forests*. - 2020. - Vol. 11. - N. 9. - Article 979.

159. Lützw, Mv. Stabilization of Organic Matter in Temperate Soils: Mechanisms and Their Relevance under Different Soil Conditions – a Review/ Mv. Lützw, I. Kogel-Knabner, K. Ekschmitt, E. Matzner, G. Guggenberger, B. Marschner, H. Flessa // *European Journal of Soil Science*. - Vol.57. - N.4. - 2006. - P.426–445.

160. Mac, N. Hierarchical partitioning public-domain software./ N.R. Mac, C. Walsh // *Biodiversity and Conservation*. - 2004. - Vol. 13. - P. 659-660. URL <https://search.proquest.com/openview/6f19c4d612b6cf75b106c479e7084a58/1>.

161. Marschner, B. How relevant is recalcitrance for the stabilization of organic matter in soils? / B. Marschner, S. Brodowski, A. Dreves, G. Gleixner, A. Gude, P.M. Grootes, G.L. Wiesenberg // *Journal of plant nutrition and soil science*. - 2008. - Vol. 171. - N. 1. - P. 91–110.

162. Mayer, M. Tamm Review: Influence of forest management activities on soil organic carbon stocks: A knowledge synthesis / M. Mayer, C.E. Prescott, W.E. Abaker, L. Augusto, L. Cécillon, G.W. Ferreira, L. Vesterdal // *Forest Ecology and Management*. - Vol.466. - 2020. - P.118–127.

163. Meentemeyer, V. Macroclimate and lignin control of litter decomposition rates / V. Meentemeyer // *Ecology*. - 1978. - Vol. 59. - N. 3. - P. 465–472.

164. Melillo, J.M. Nitrogen and lignin control of hardwood leaf litter decomposition dynamics / J.M. Melillo, J.D. Aber, J.F. Muratore // *Ecology*. - 1982. - Vol. 63. - N. 3. - P. 621–626.

165. Methods for integrated monitoring in the Nordic countries. - Nordic Council of Ministers:Nord. - 1989. - Vol.68. - 280 p.

166. Mikutta, R. Microbial and abiotic controls on mineral-associated organic matter in soil profiles along an ecosystem gradient / R. Mikutta, S. Turner,

A. Schippers, N. Gentsch, S. Meyer-Stüve, L.M. Condon, G. Guggenberger // Scientific reports. - 2019. - Vol. 9. - N. 1. - P. 1–9.

167. Misir, M. Estimations of total ecosystem biomass and carbon storage for fir (*Abies nordmanniana* S. subsp. *bornmülleriana* (Mattf.)) forests (Western Black Sea Region) / M. Misir, N. Misir, S. Erkut // Kastamonu University Journal of Forestry Faculty. - 2012. - Vol. 12. - N. 3. - P. 60–64.

168. Nakhavali, M. Leaching of dissolved organic carbon from mineral soils plays a significant role in the terrestrial carbon balance / M. Nakhavali, R. Lauerwald, P. Regnier, B. Guenet, S. Chadburn, P. Friedlingstein // Global change biology. - 2021. - Vol. 27. - N. 5. - P. 1083-1096.

169. Neff, J.C. Variable effects of nitrogen additions on the stability and turnover of soil carbon / J.C. Neff, A.R. Townsend, G. Gleixner, S.J. Lehman, J. Turnbull, W.D. Bowman // Nature. - 2002. - Vol. 419. - N. 6910. - P. 915–917.

170. Neiryneck, J. Impact of *Tilia platyphyllos* Scop., *Fraxinus excelsior* L., *Acer pseudoplatanus* L., *Quercus robur* L. and *Fagus sylvatica* L. on earthworm biomass and physico-chemical properties of a loamy topsoil / J. Neiryneck, S. Mirtcheva, G. Sioen, N. Lust // Forest Ecology and Management. - 2000. - Vol. 133. - N. 3. - P. 275–286.

171. Ni, X. Accelerated foliar litter humification in forest gaps: dual feedbacks of carbon sequestration during winter and the growing season in an alpine forest / X. Ni, , W. Yang, B. Tan, J. He, L. Xu, H. Li, F. Wu // Geoderma. - 2015. - Vol. 241. - P. 136–144.

172. Nierop, K.G.J. Origin of aliphatic compounds in a forest soil / K.G.J. Nierop // Organic geochemistry. - 1998. - Vol. 29. - N. 4. - P. 1009–1016.

173. Nierop, K.G.J. Linking the B ring hydroxylation pattern of condensed tannins to C, N and P mineralization. A case study using four tannins / K.G.J. Nierop, C.M. Preston, J.M. Verstraten // Soil Biology and Biochemistry. - 2006. - Vol. 38. - N. 9. - P. 2794–2802.

174. Nohrstedt, H.Ö. Soil water chemistry as affected by liming and im fertilization at two Swedish coniferous forest sites / H.Ö. Nohrstedt // *Scandinavian Journal of Forest Research*. - 1992. - Vol. 7. - N. 1-4. - P. 143–153.
175. Oostra, S. Impact of tree species on soil carbon stocks and soil acidity in southern Sweden / S. Oostra, H. Majdi, M. Olsson // *Scandinavian Journal of Forest Research*. - 2006. - Vol. 21. - N. 5. - P. 364–371.
176. Patoine, G. Plant litter function-al diversity effects on litter mass loss depend on the macro-detritivore community / G. Patoine, , M.P. Thakur, J. Friese, C. Nock, L. Höning, J. Haase, M. Scherer-Lorenzen, N. Eisenhauer // *Pedobiologia*. - 2017. - Vol. 65. - P. 29–42.
177. Penne, C. The impact of the canopy structure on the spatial variability in forest floor carbon stocks / C. Penne, B. Ahrends, M. Deurer, J. Böttcher // *Geoderma*. - 2010. - Vol. 158. - N. 3-4. - P. 282–297.
178. Perez-Harguindeguy, N. Chemistry and toughness predict leaf litter decomposition rates over a wide spectrum of functional types and taxa in central Argentina / N. Perez-Harguindeguy, S. Díaz, J.H. Cornelissen, F. Vendramini, M. Cabido, A. Castellanos // *Plant and soil*. - 2000. - Vol. 218. - N.1. - P. 21–30.
179. Polyakova, O. Impact of deciduous tree species on litterfall quality, decomposition rates and nutrient circulation in pine stands / O. Polyakova, N. Billor // *Forest Ecology and Management*. - 2007. - Vol. 253. - N. 1-3. - P. 11–18.
180. Ponti, F. Fine root dynamics of pedunculate oak and narrow-leaved ash in a mixed-hardwood plantation in clay soils / F. Ponti, , G. Minotta, L. Cantoni, U. Bagnaresi // *Plant and Soil*. - 2004. - Vol. 259. - N. 1. - P. 39–49.
181. Prescott, C. E. Decomposition of broadleaf and needle litter in forests of British Co-lumbia: influences of litter type, forest type, and litter mixtures / C.E. Prescott, L.M. Zabek, C.L.Staley, R. Kabzems // *Canadian Journal of Forest Research*. - 2000. - Vol. 30. - P. 1742–1750.
182. Puhe, J. Growth and development of the root system of Norway spruce (*Picea abies*) in forest stands—a review / J. Puhe // *Forest ecology and management*. - 2003. - Vol. 175. - N. 1-3. - P. 253–273.

183. Quenea, K. Variation in lipid relative abundance and composition among different particle size fractions of a forest soil / K. Quenea, S. Derenne, C. Largeau, C. Rumpel, A. Mariotti // *Organic Geochemistry*. - 2004. - Vol. 35. - N. 11-12. - P. 1355–1370.
184. R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. 2020. Available online: <https://www.R-project.org/> (accessed on 28 August 2021).
185. Rasse, D.P. Is soil carbon mostly root carbon? Mechanisms for a specific stabilisation / D.P. Rasse, C. Rumpel, M.F. Dignac // *Plant and soil*. - 2005. - Vol. 269. - N. 1. - P. 341–356.
186. Reich, P.B. Linking litter calcium, earthworms and soil properties: a common garden test with 14 tree species / P.B. Reich, J. Oleksyn, J. Modrzynski, P. Mrozinski, S.E. Hobbie, D.M. Eissenstat, M.G. Tjoelker // *Ecology letters*. - 2005. - Vol. 8. - N. 8. - P. 811–818.
187. Sariyildiz, T. Variation in the chemical composition of green leaves and leaf litters from three deciduous tree species growing on different soil types / T. Sariyildiz, J.M. Anderson // *Forest Ecology and Management*. - 2005. - Vol. 210. - N. 1-3. - P. 303–319.
188. Shanin, V. Tree species composition affects productivity and carbon dynamics of different site types in boreal forests / V. Shanin, A. Komarov, R. Mäkipää // *European Journal of Forest Research*. - 2014. - Vol. 133. - P. 273–286.
189. Shmida, A. Coexistence of plant species with similar niches / A. Shmida, S. Ellner // *Vegetatio*. - 1984. - Vol. 58. - P. 29-55.
190. Silver, W.L. Global patterns in root decomposition: comparisons of climate and litter quality effects / W.L. Silver, R.K. Miya // *Oecologia*. - 2001. - Vol. 129. - N. 3. - P. 407–419.
191. Simon, J. Environmental conditions and species identity drive metabolite levels in green leaves and leaf litter of 14 temperate woody species / J. Simon, V.M. Dörken, A. L-M-Arnold, B. Adamczyk // *Forests*. - 2018. - Vol. 9. - N. 12. - Article 775.

192. Six, J. A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics / J. Six, H. Bossuyt, S. Degryze, K. Denef // *Soil and tillage research*. - 2004. - Vol. 79. - N. 1. - P. 7–31.
193. Six, J. Stabilization mechanisms of soil organic matter: implications for C-saturation of soils / J. Six, R. T. Conant, E.A. Paul, K. Paustian // *Plant and soil*. - 2002. - Vol. 241. - No. 2. - P. 155–176.
194. Smolander, A. Soil microbial activities and characteristics of dissolved organic C and N in relation to tree species / A. Smolander, V.Kitunen // *Soil Biology and Biochemistry*. - 2002. - Vol. 34. - N. 5. - P. 651–660.
195. Soares, M. Microbial growth and carbon use efficiency in soil: links to fungal-bacterial dominance, SOC-quality and stoichiometry / M. Soares, J. Rousk // *Soil Biology and Biochemistry*. - 2019. - Vol. 131. - P. 195–205.
196. Sokol, N.W. Microbial formation of stable soil carbon is more efficient from belowground than aboveground input / N.W. Sokol, M. A. Bradford // *Nature Geoscience*. - 2019. - Vol. 12. - N. 1. - P. 46–53.
197. Spielvogel, S. Distribution of cutin and suberin biomarkers under forest trees with different root systems / S. Spielvogel, J. Prietzel, J. Leide, M. Riedel, J. Zemke, I. Kögel-Knabner // *Plant and soil*. - 2014. - Vol. 381. - N. 1. - P. 95–110.
198. Swanston, C. Long-term effects of elevated nitrogen on forest soil organic matter stability / C. Swanston, P.S. Homann, B.A. Caldwell, D.D. Myrold, L. Gano, P. Sollins // *Biogeochemistry*. - 2004. - Vol. 70. - N. 2. - P. 229–252.
199. Swift, M.J. Decomposition in terrestrial ecosystems / M.J. Swift, O.W. Heal, J.M. Anderson, J.M. Anderson // Berkeley: Univ. of California Press, 1979. - Vol. 5. - 372 p.
200. Thevenot, M. Fate of lignins in soils: a review / M. Thevenot, M.F.Dignac, C. Rumpel // *Soil Biology and Biochemistry*. - 2010. - Vol. - 42. - N. 8. - P. 1200–1211.
201. Totsche, K.U. Microaggregates in soils / K.U. Totsche, W. Amelung, M.H. Gerzabek, G. Guggenberger, E. Klumpp, C. Knief, E. Lehndorff, R. Mikutta,

S. Peth, A. Prechtel, N. Ray, I. Kögel-Knabner // *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. - 2018. - Vol. 181. - N. 1. - P. 1–33.

202. Verstraeten, A. Impact of air-borne or canopy-derived dissolved organic carbon (DOC) on forest soil solution DOC in Flanders, Belgium / A. Verstraeten, B. De Vos, J. Neiryck, P. Roskams, M. Hens // *Atmospheric environment*. - 2014. - Vol. 83. - P. 155-165.

203. Vesterdal, L. Do tree species influence soil carbon stocks in temperate and boreal forests? / L. Vesterdal, N. Clarke, B.D. Sigurdsson, P. Gundersen // *Forest Ecology and Management*. - 2013. - Vol. 309. - P. 4–18.

204. Vesterdal, L. Carbon and nitrogen in forest floor and mineral soil under six common European tree species / L. Vesterdal, , I. K. Schmidt, I. Callesen, L.O. Nilsson, P. Gundersen // *Forest Ecology and Management*. - 2008. - Vol. 255. - N. 1. - P. 35–48.

205. Wardle, D.A. Determinants of litter mixing effects in a Swedish boreal forest / D.A. Wardle, M.C. Nilsson, O. Zackrisson, C. Gallet // *Soil Biology and Biochemistry*. - 2003. - Vol. 35. - P. 827–835.

206. Wiesmeier, M. Soil organic carbon storage as a key function of soils-a review of drivers and indicators at various scales / M. Wiesmeier, L. Urbanski, E. Hobbey, B. Lang, M. von Luetzow, E. Marin-Spiotta, van B. Wesemael, E. Rabot, M. Ließ, N. Garcia-Franco, U. Wollschläger, H.-J. VogelIngrid, I. Kögel-Knabner // *Geoderma*. - 2019. - Vol. 333. - P. 149–162.

207. Wolters, V. Invertebrate control of soil organic matter stability / V. Wolters // *Biology and fertility of Soils*. - 2000. - Vol. 31. - N. 1. - P. 1–19.

208. 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.

209. Xiao, C. Lignin from rice straw Kraft pulping: Effects on soil aggregation and chemical properties / C. Xiao, R. Bolton, W.L. Pan // *Bioresource technology*. - 2007. - Vol. 98. - N. 7. - P. 1482–1488.

210. Zhang, D. Rates of litter decomposition in terrestrial ecosystems: global patterns and controlling factors / D. Zhang, D. Hui, Y. Luo, G. Zhou // *Journal of Plant Ecology*. - 2008. - Vol. 1. - N. 2. - P. 85–93.

211. Zhang, W. Functions of earthworm in ecosystem. / W. Zhang, D. Chen, C. Zhao // *Biodiversity Science*. – 2007. - Vol. 15(2). - P.142-153.

212. Zheng, L.T. Tree species diversity promotes litterfall productivity through crown complementarity in subtropical forests / L.T. Zheng, H.Y.H. Chen, E.R. Yan // *Journal of Ecology*. - 2019. - Vol. 107. - N. 4. - P. 1852–1861.

213. Zhou, W.J. Direct effects of litter decomposition on soil dissolved organic carbon and nitrogen in a tropical rainforest / W.J. Zhou, L.Q. Sha, D.A. Schaefer, Y.P. Zhang, Q.H. Song, Z.H. Tan, H.L. Guan // *Soil Biology and Biochemistry*. - 2015. - Vol. 81. - P. 255–258.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Морфологическое описание почвенных разрезов

МОСКВОРЕЦКО-ОКСКАЯ РАВНИНА

РАЗРЕЗ: Почвенный разрез на опытной площадке Val 16_15

Дата заложения разреза: **27.09.2016**

Данные об авторе описания: Кузнецова А.И.

Административно-географическое положение: Москва, Новомосковский административный округ

Климат: Умеренно-континентальный

Рельеф: разрез заложен в средней части пологого склона водораздела реки Ликовы в 10 км к ЮЗ от МКАД г. Москвы. Микрорельеф не выражен.

Растительность: Березово-липовый лес волосистоосоковый. Вторичное послерубочное сообщество с формулой древостоя 8Лп2Б+Ос+Д+Кл+Е.

Почвообразующая порода: покровный суглинок, подстилаемый легкосуглинистой мореной, не вскипает

Хозяйственное использование почвы: С 1935 года территория используется как часть Лесопаркового защитного пояса Москвы. Проводятся рубки ухода.

LFH 0 – 1.5 (2) см деструктивная, среднесопряженная, примитивная, очень маломощная, травяно-лиственная. В подгоризонте подстилки L (0 – 1.5 см) доминируют листья клена, осины, березы, отмершие части осоки волосистой, ветки. Подгоризонт подстилки F(H) (1.5 – 2 см) фрагментарен, состоит из полуразложившихся листьев, веток.

A 1,5-20 (25) см. Свежий. Темно-бурый цвет. Легкий суглинок. Ореховатая структура. Рыхлое сложение. Густые корни. Граница волнистая, переход ясный по цвету и плотности.

Ae 20-25 (32) см. Свежий. Светло-бурый цвет. Легкий суглинок. Рыхлое сложение. Структура комковатая. Много корней. Граница волнистая, переход по цвету заметный.

EL (фрагментарный) 25-40 см, (языки до 60 см). Свежий. Светло-серый (палевый) с коричневыми вкраплениями. Много корней. Структура комковатая. Легкий суглинок. Граница языковатая, переход постепенный по цвету и плотности.

BT 40-80 см. Свежий. Буро-коричневый цвет с палевыми языками гор. Е. Темно-бурые затеки по ходам корней. Глинистые кутаны и скелетаны. Немного Fe-Mn примазок. Тяжелый суглинок. Структура плитчато-глыбистая. Твердоватая. Уплотненное сложение. Единичные корни. Граница неясная, переход постепенный по количеству новообразований.

BCg (80 см и ниже до 100 см.) Цвет темно-коричневый. Появляются языки сизого цвета. Тяжелый суглинок. Структура плитчато-глыбистая. Твердоватая. Уплотненное сложение. Обильное количество Fe-Mn примазок.

Классификационное положение: дерново-подзолистая (Классификация..., 2004) (Albic Retisols, по WRB, 2015) на покровном суглинке.

РАЗРЕЗ: Почвенный разрез на опытной площадке Val 16_11

Дата заложения разреза: 15.09.2016

Данные об авторе описания: Кузнецова А.И.

Административно-географическое положение: Москва, Новомосковский административный округ

Климат: Умеренно-континентальный

Рельеф: разрез заложен в средней части пологого склона водораздела реки Ликовы в 10 км к ЮЗ от МКАД г. Москвы. Микрорельеф не выражен.

Растительность: широколиственно-еловый кислично-разнотравный лес. Формула древостоя 7Е2Д1Б+Ос+Лп+С.

Почвообразующая порода: покровный суглинок, подстилаемый легкосуглинистой мореной, не вскипает

Хозяйственное использование почвы: С 1935 года территория используется как часть Лесопаркового защитного пояса Москвы. Проводятся рубки ухода.

LFH 0 – 1.5 (2) см ферментативная, среднесопряженная, маломощная, травяно-хвойная. В подгоризонте подстилки L (0 – 1 см) доминирует хвоя ели, листья липы, березы, дуба, осины. Ветки. Шишки. Подгоризонт подстилки F(H) (1 – 2 см) состоит из полуразложившихся листьев, веток, древесины. Подгоризонт H - представлен фрагментарно.

A 1,5-10 (15) см. Свежий, темно-бурый, однородный, не пятнистый. Легкосуглинистый. Ореховатый, мягкий. Рыхлое сложение, мелкопористый. Густые корни. Граница ровная, переход ясный по цвету и по обилию корней.

Ae 10-25 (32) см. Влажноватый, неоднородный, на палевом фоне темно-коричневые пятна. Встречаются Fe-Mn примазки черного цвета. Тяжелосуглинистый. Твердоватый, уплотненная. Структура крупно-ореховатая. Единичные корни. Граница затечная, переход заметный по цвету.

EL (фрагментарный) 25-40 см, (языки до 50 см). Влажноватый, на темно-палевом фоне коричневые пятна до 2 см и гумусовые затеки по ходам корней. Средний суглинок. Структура плитчатая. Твердоватый, плотное сложение. Встречаются Fe-Mn примазки черного цвета. Встречаются корни до 1 см в диаметре. Граница затечная. Переход постепенный по цвету и плотности.

BT 40-80 см. На темно-коричневого фоне языки горизонта E до глубины 70 см. Кутаны светло-палевого цвета. Единичные корни. Структура крупно-плитчатая. Плотное сложение, твердоватый. Встречаются Fe-Mn примазки черного цвета. Граница неясная, переход постепенный по цвету и плотности.

BCg (80 см и ниже до 100 см.) На темно-коричневом фоне сизые пятна-языки до 10 см. структура глыбистая. Твердый, плотное сложение. Средне-тяжелосуглинистый. Твердый, плотное сложение.

Классификационное положение: дерново-подзолистая (Классификация..., 2004) (Albic Retisols, по WRB, 2015) на покровном суглинке.

БРЯНСКОЕ ПОЛЕСЬЕ

РАЗРЕЗ: Почвенный разрез на опытной площадке БП-1а

Дата заложения разреза: 05.09.2016

Данные об авторе описания: Кузнецова А.И.

Административно-географическое положение: Брянская обл., п. Нерусса, ГПБЗ «Брянский лес».

Климат: Умеренно-континентальный

Рельеф: разрез заложен на вершине грив зандровой местности моренно-зандрового ландшафта, в 3 квартале в 10 км от центральной усадьбы заповедника. Микрорельеф не выражен.

Растительность: Сосняк кустарничково-зеленомошный. Формула древостоя 9С1Б+Д.

Почвообразующая порода: зандровые пески

Хозяйственное использование почвы: С 1987 года территория приобрела статус ООПТ.

Место посадки культуры сосны.

L, 0-3 см. Деструктивный слой лесной подстилки из опада прошлого и текущего года (хвоя, редкие листья дуба, кора, шишки, мелкие ветки), сухой. Моховой начес.с доминированием *Pleurozium schreberi* (Brid.) Mitt. и *Dicranum polysetum* Sw..

F/FH, 3-7 см. Ферментативный, или ферментативно-гумифицированный слой лесной подстилки. Содержит разлагающийся опад: остатки древесины. Очень много мелких корней растений. Граница волнистая, переход ясный.

AУ, 7-15 (17) см. Пепельно-серый цвет. Бесструктурный, рыхлопесчаный (песок средне-мелкозернистый). Включения угля. Содержит скелетных и мелких корней. Граница затечная, переход заметный.

AУе 15-27 см. Пепельно-серый цвет с светло-палевыми языками низлежащего горизонта. Бесструктурный, рыхлопесчаный (песок средне-мелкозернистый). Включения угля. Содержит скелетных и мелких корней. Граница затечная, переход заметный.

E 27-33 см. Светло-желто-белесый. Бесструктурный, рыхлопесчаный. Мелкие корни, единично скелетные корни. Периодически встречаются очень глубокие затеки вышележащего горизонта, разрывающие толщу г-та E. Граница затечная, переход заметный.

BF1 33-53 см. Ржаво-оранжевый, насыщенно-коричневый. Бесструктурный, уплотненный, рыхлопесчаный. Вкрапления черных пятен корневых ходов. Средние корни. Граница волнистая, переход постепенный.

BF2 53-78 см. Бледно-охристый, светло-коричневый, одиночные включения пятен корневых ходов. Бесструктурный, уплотненный, рыхлопесчаный. Граница волнистая, переход постепенный.

BCf 78-100 см. Немного бледнее предыдущего горизонта. Бесструктурный, уплотненный, рыхлопесчаный. Вкрапления черных пятен корневых ходов. Граница волнистая, переход постепенный.

Cf 100-135 см. Желтовато-палевый. Бесструктурный, уплотненный, рыхлопесчаный. Вкрапления черных пятен корневых ходов.

Классификационное положение: дерново-подзол иллювиально железистый ненасыщенный неглубокосветлоосветленный песчаный на зандровых песках (Классификация..., 2004). Albic Umbric Podzol, по WRB, 2015.

РАЗРЕЗ: Почвенный разрез на опытной площадке БП-2i

Дата заложения разреза: **02.09.2016**

Данные об авторе описания: Кузнецова А.И.

Административно-географическое положение: Брянская обл., п. Нерусса, ГПБЗ «Брянский лес».

Климат: Умеренно-континентальный

Рельеф: разрез заложен на вершине грив зандровой местности моренно-зандрового ландшафта, в 10 км от центральной усадьбы заповедника. Микрорельеф не выражен.

Растительность: Сосняк сложный волосистоосоково-разнотравный. Формула древостоя 5С2Е2Б1Д+Кл+Лп+Ос.

Почвообразующая порода: зандровые пески

Хозяйственное использование почвы: С 1987 года территория приобрела статус ООПТ.

Место посадки культуры сосны.

L 0-0,5 см. Слой лесной подстилки состоит в основном из хвои сосны, листьев березы, липы.

F 0,5-2 см. Полуразложившиеся листья, хвоя, мицелий, остатки древесины.

H 2-4 см. Гумифицированный слой подстилки, хорошо выражен, влажноватая, темно-бурая, редкие светло-коричневые пятна, Густые корни, сильно-разложившие растительные остатки, червотроины и угли. Граница неясная, переход постепенный по цвету.

AУ 4-12 (14) см, свежий, на сером фоне гумусовые затеки и пятна светло-палевого песка, много корней, граница волнистая, переход постепенный по цвету.

E 12-34 см, свежий, палево-белесый с многочисленными крупными пятнами светло-охристого цвета, гумусовые затеки по корням растений. Корней мало, диаметр до 1 см. Отмечены затеки горизонта АЕ, включения угля. Граница затечная, переход постепенный по цвету.

BF 34-55 см, свежий, светло-охристый, затеки и пятна гор. E, гумусовые затеки по корням. Корни единичные, диаметром до 3 мм. Мелкие железистые пятна до 1 см. Граница неясная, переход постепенный по плотности.

BCff 55-85 см, свежий, чуть светлее предыдущего, пятна гор. C, псевдофибровые новообразования. Корни единичные, граница неясная, переход постепенный по плотности Cff 85 и ниже. Палевый, очень много псевдофибров, темного цвета.

Классификационное положение: дерново-подзол иллювиально железистый ненасыщенный неглубокосветлоосветленный песчаный на зандровых песках (Классификация..., 2004). Albic Umbric Podzol, по WRB, 2015.

РАЗРЕЗ: Почвенный разрез на опытной площадке Б1-1i

Дата заложения разреза: **06.09.2016**

Данные об авторе описания: Кузнецова А.И.

Административно-географическое положение: Брянская обл., п. Нерусса, ГПБЗ «Брянский лес».

Климат: Умеренно-континентальный

Рельеф: разрез заложен на вершине грив задровой местности моренно-зандрового ландшафта, в 10 км от центральной усадьбы заповедника. Микрорельеф не выражен.

Растительность: Полидоминантный широколиственный лес с елью зеленчуково-волосистоосоковым. Формула древостоя 3Д3КлЗЛп1Е+Вз+Ос+Яс.

Почвообразующая порода: задровые пески

Хозяйственное использование почвы: С 1987 года территория приобрела статус ООПТ.

L 0-0,5 см. Листья липы, остатки древесины. Листья клена, вяза, осины, желуди.

ГН 0,5-2 см. Полуразложившиеся листья, мицелий, остатки древесины. Темно-черно-серый, вкрапления минеральной части, ветошь, полуразложившийся опад, обилие мелких корней.

АУ 2- 7 (12) см. Свежий. Темно-серый, песчаный, пронизан корнями, граница ровная, переход постепенный.

АУе 7-16 (30) см. Свежий. Серый, песчаный, много корней. Рыхлый. Граница по затекам гумуса, переход ясный.

Е 16-40 см. Свежий. Светло-серый, встречаюся рыжие пятна. Рыхлый. Граница неясная, переход постепенный по потности и цвету.

ВФ 40-80 см. Свежий. Бежевый, неоднородный: пятна светло-серого и бурого цвета. Рыхлый. Граница ровная, переход постепенный по цвету.

ВС 80-100 см. Свежий. Светло-серый. Бесструктурный. Слабо уплотненный. Песчаный.

С 100 и ниже. Свежий. Светло-палевый. Бесструктурный. Слабо уплотненный. Песчаный.

Классификационное положение: дерново-подзол иллювиально железистый ненасыщенный глубокосветлоосветленный песчаный на задровых песках (Классификация..., 2004). Albic Umbric Podzol, по WRB, 2015.

СЕВЕРО-ЗАПАДНЫЙ КАВКАЗ

РАЗРЕЗ: Почвенный разрез на опытной площадке К1-1i

Дата заложения разреза: 10.07.2019

Данные об авторе описания: Кузнецова А.И.

Административно-географическое положение: Краснодарский край, п. Отдаленный, Северо-Западный Кавказ, долина р. Пшеха.

Климат: Субтропический кратковременно промерзающий

Рельеф: лесные предгорные районы Северо-Западного Кавказа, 600 м над у.м.; пологий склон (нижняя часть склона) крутизной до 3-4°; Южная экспозиция.

Растительность: Осиново-грабовый жимолостно-мелкотравный лес. Формула древостоя 6Гр3Ос1Д+Б+Пх+Лп+Вш.

Почвообразующая порода: Элювий глинистых сланцев, слабоскальная, не вскипает

Хозяйственное использование почвы: проводятся выборочные рубки

LF 0-2 см, ферментативная, среднесопряженная, примитивная, маломощная, травяно-лиственная. Свежего опада нет, остатки листьев дуба, осоки, жилки, ветки.

H 2-3 см, гумифицированная, мажущая.

A 3-15 (20) см, свежий, однородный темно-бурый, многочисленный мицелий, среднесуглинистый, среднекаменистый, комковатый, твердоватый, рыхлый, многочисленные тонкие корни, угли, остатки древесины, червороины, гумусовые кутаны, кремнеземистая присыпка, переход постепенный, граница ровная по цвету и плотности.

AB 15-24 (30) см, влажный, неравномерный однородный бурый, среднесуглинистый, среднекаменистый, крупнокомковатый, твердоватый, плотный, малочисленные корни, кремнеземистая присыпка, железисто-марганцевые конкреции, включения угля, мертвых корней, переход ясный, граница волнистая по цвету.

Bg 30-55 (60) см, влажный, неравномерный пятнистый бурый с охристыми и сизыми языками, средне-тяжелосуглинистый, среднекаменистый, среднекомковатый, твердый, плотный, многочисленные железисто-марганцевые ортштейны и пленки по границам структурных отдельностей, включения угля, переход ясный, граница волнистая по цвету.

BCg глубже 50 (55) см, свежий, с признаками оглеения, тяжелосуглинистый, слабокаменистый, глыбыстый, очень твердый, плотный массивный.

Классификационное положение: Бурозем насыщенный тяжелосуглинистый на элювии глинистых сланцев с признаками оглеения

РАЗРЕЗ: Почвенный разрез на опытной площадке КП-1i

Дата заложения разреза: 8.07.2019

Данные об авторе описания: Кузнецова А.И.

Административно-географическое положение: Краснодарский край, п. Отдаленный, Северо-Западный Кавказ, долина р. Пшеха.

Климат: Субтропический кратковременно промерзающий

Рельеф: лесные предгорные районы Северо-Западного Кавказа, 600 м над у.м.; пологий склон крутизной до 2°; Микрорельеф не выражен. Южная экспозиция.

Растительность: Буково-пихтово-грабовый мелкотравный лес. Формула древостоя 5Гр2Пх2Бк1Ос+Д+Яс+Б+К+Лп+Вш.

Почвообразующая порода: Элювий глинистых сланцев, слабоскальная, не вскипает

Хозяйственное использование почвы: проводятся выборочные рубки

LFH 0 - 1.5 см ферментативная, среднесопряженная, маломощная, травяно-лиственная.

A 1,5-12 (15) см, свежий, однородный темно-бурый, среднесуглинистый, слабокаменистый, комковатый, твердоватый, рыхлый, многочисленные корни, червороины, гумусовые кутаны, переход ясный, граница ровная по цвету.

Ae 12-30 (32) см, свежий, неравномерный однородный светло-бурый, среднесуглинистый, слабокаменистый, среднекомковатый, твердоватый, рыхлый, многочисленные тонкие корни, кремнеземистая присыпка, железисто-марганцевые конкреции, включения угля, мертвых корней, переход ясный, граница затечная по цвету.

Bg 30-50 (55) см, свежий, неравномерный пятнистый бурый с охристыми и сизыми языками, средне-тяжелосуглинистый, слабокаменистый, среднекомковатый, твердый, плотный, многочисленные тонкие корни, многочисленные железисто-марганцевые конкреции, включения угля, переход ясный, граница волнистая по цвету.

BCg глубже 50 (55) см, свежий, с признаками оглеения, тяжелосуглинистый, слабокаменистый, глыбыстый, очень твердый, плотный массивный, железисто-марганцевые конкреции

Классификационное положение: Оподзоленный бурозем насыщенный тяжелосуглинистый на элювии глинистых сланцев с признаками оглеения

РАЗРЕЗ: Почвенный разрез на опытной площадке КПП-2i

Дата заложения разреза: 16.07.2019

Данные об авторе описания: Кузнецова А.И.

Административно-географическое положение: Республика Адыгея, п. Гузерипль, Северо-Западный Кавказ, долина р. Молчепа.

Климат: Субтропический кратковременно промерзающий

Рельеф: лесные предгорные районы Северо-Западного Кавказа, 600 м над у.м.; пологий склон (нижняя часть) крутизной до 6°;

Растительность: Пихтово-буковый мертвопокровный лес. Формула древостоя 8Б+2Пх+Гр.

Почвообразующая порода: Элювий глинистых сланцев, слабоскальная, не вскипает

Хозяйственное использование почвы: С 1924 года территория приобрела статус ООПТ

LFH 0-2 см, среднесопреженная, маломощная, травяно-лиственная. Хвои пихты очень мало.

Ag 0,5-21 (30) см, сырой, однородный темно-бурый с оттенком сизого, среднесуглинистый, слабокаменистый, комковатый, твердоватый, рыхлый, многочисленные тонкие корни, переход постепенный, граница ровная по цвету и плотности.

ABg 21-35 (40) см, сырой, неравномерный однородный сизый, среднесуглинистый, слабокаменистый, крупнокомковатый, твердоватый, плотный, многочисленные мелкие корни, включения угля, темно-бордовые железо-марганцевые конкреции рыхлые, переход ясный, граница волнистая по цвету.

Bg 40-66 (50) см, мокрый, неравномерный пятнистый сизо-бурый, средне-тяжелосуглинистый, слабокаменистый, среднекомковатый, вода сочится из стенок разреза переход ясный, железо-марганцевые конкреции, граница волнистая по цвету. Затапливает верховодкой с глубины 66 см.

Классификационное положение: Глееватый бурозем насыщенный тяжелосуглинистый на элювии глинистых сланцев

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Таблица П1. Характеристика горизонта ВС почв хвойно-широколиственных лесов

Регион*	Тип леса**	pH _{вод}		Валовое содержание, % (на абс.сух. навеску)									
		\bar{x}	$S\bar{x}$	Ca		Mg		K		Al		Fe	
		\bar{x}	$S\bar{x}$	\bar{x}	$S\bar{x}$	\bar{x}	$S\bar{x}$	\bar{x}	$S\bar{x}$	\bar{x}	$S\bar{x}$	\bar{x}	$S\bar{x}$
МО	МО1	5.1	0.1	0.7	0.04	0.9	0.1	1.0	0.1	3.6	0.2	1.8	0.2
	МО2	5.1	0.1	0.7	0.03	0.8	0.1	1.0	0.1	3.6	0.1	1.8	0.1
БП	БП1	5.1	0.4	0.3	0.001	0.2	0.01	0.1	0.01	0.2	0.02	0.1	0.01
	БП2	5.5	0.5	0.4	0.03	0.2	0.03	0.4	0.1	0.8	0.2	0.2	0.04
	БП3	5.5	0.8	0.3	0.01	0.1	0.04	0.1	0.01	0.2	0.02	0.04	0.01
СЗК	СЗК1	5.6	0.3	0.5	0.02	0.7	0.01	0.9	0.02	4.8	0.4	2.6	0.5
	СЗК2	5.1	0.8	0.4	0.02	1.0	0.1	1.1	0.2	5.4	0.6	2.6	0.3
	СЗК3	5.6	0.2	0.7	0.1	1.0	0.1	0.9	0.04	4.5	0.1	2.1	0.3

Примечание: \bar{x} – среднее, $S\bar{x}$ – стандартное отклонение. *МО-Москворецко-Окская равнина, БП-Брянское Полесье, СЗК-Северо-Западный Кавказ; ** БП1 – Сосняк кустарничково-зеленомошный ($n=3$), БП2 – Сосняк сложный волосистоосоково-разнотравный ($n=3$), БП3 – Полидоминантный широколиственный лес с елью зеленчуково-волосистоосоковый ($n=3$), МО1 – Березово-липовый лес волосистоосоковый ($n=6$), МО2 – Широколиственно-еловый кислично-разнотравный лес ($n=3$), СЗК1 – Осиново-грабовый жимолостно-мелкотравный лес ($n=3$), СЗК2 – Буково-пихтово-грабовый мелкотравный лес ($n=3$), СЗК3 – Пихтово-буковый мертвopoкpoвный лес ($n=3$)

Таблица П2. Описательная статистика переменных для расчета запасов углерода регионов исследования

	Среднее			Ст. отклонение			Мин			Макс			n			p		
	СЗК	МО	БП	СЗК	МО	БП	СЗК	МО	БП	СЗК	МО	БП	СЗК	МО	БП	СЗК	МО	БП
Слой FH подстилки																		
С _{общ} , %	27.4	14.0	34.4	8.4	7.1	8.5	11.9	5.0	18.1	41.9	34.0	47.1	57	36	53	0.51	0.00	0.00
Запас, г/м ²	693.8	562.7	1293.6	424.3	435.4	685.6	177.6	76.6	384.8	2989.7	1526.9	3289.8	75	18	56	0.00	0.01	0.00
Горизонт А																		
С _{общ} , %	4.5	3.4	3.1	1.6	1.1	1.7	1.1	1.8	0.8	7.6	8.0	6.9	57	47	53	0.00	0.12	0.00
Плотность, г/см ³	0.9	1.0	1.1	0.2	0.2	0.2	0.5	0.6	0.6	1.3	1.4	1.6	72	42	56	0.00	0.96	0.00
Горизонт АВ/ЕL/Е																		
С _{общ} , %	1.7	0.8	0.3	0.8	0.3	0.2	0.5	0.3	0.1	3.2	1.6	0.7	57	47	53	0.00	0.04	0.00
Плотность	1.1	1.3	1.4	0.1	0.03	0.3	0.8	1.2	1.0	1.3	1.3	2.0	30	20	26	0.00	0.74	0.00

ь, г/см ³																		0	5	0
Горизонт В/ВТ/ВФ																				
С _{общ} , %	0.9	0.3	0.3	0.6	0.2	0.1	0.3	0.2	0.1	2.5	1.0	0.6	57	47	55	0.00	0.00	0.00		
Плотность, г/см ³	1.2	1.3	1.6	0.1	0.03	0.5	0.9	1.2	0.8	1.3	1.3	2.4	30	20	26	2	1	0		

Таблица ПЗ. Описательная статистика переменных для расчета запасов углерода объектов Северо-Западного Кавказа

	Среднее			Ст. отклонение			Мин			Макс			n			p				
	СЗК 1	СЗК 2	СЗК 3	СЗК 1	СЗК 2	СЗК 3	СЗК 1	СЗК 2	СЗК 3	СЗК1	СЗК2	СЗК3	СЗК 1	СЗК 2	СЗК 3	СЗК 1	СЗК 2	СЗК 3		
Слой FH подстилки																				
С _{общ} , %	28.8	30.3	23.7	9.9	6.0	7.7	14.5	18.7	11.9	41.6	41.7	41.9	18	18	21	0.39	0.07	0.01		
Запас, г/м ²	531.8	793.8	710.4	225.1	595.5	225.3	177.6	180.7	277.0	1110.7	2989.7	1316.2	21	30	24	0.03	0.09	0.81		
Горизонт А																				
С _{общ} , %	5.3	5.5	2.9	1.3	1.1	0.8	3.1	3.6	1.1	7.3	7.6	3.8	18	18	21	0.00	0.00	0.00		
Плотность, г/см ³	0.8	0.8	1.0	0.2	0.2	0.2	0.6	0.5	0.8	1.3	1.2	1.3	21	30	21	0.11	0.07	0.00		
Горизонт АВ																				
С _{общ} , %	1.6	2.2	1.4	0.8	0.9	0.5	0.7	0.8	0.5	2.9	3.2	2.3	18	18	21	0.43	0.00	0.02		
Плотность, г/см ³	1.1	1.1	1.2	0.1	0.10	0.1	0.8	0.8	0.8	1.2	1.1	1.3	9	12	9	0.44	0.43	0.11		
Горизонт В																				
С _{общ} , %	0.9	1.2	0.6	0.5	0.7	0.2	0.4	0.5	0.3	2.2	2.5	1.0	18	18	21	0.99	0.00	0.00		
Плотность, г/см ³	1.2	1.2	1.3	0.1	0.05	0.0	0.9	1.0	1.2	1.3	1.3	1.3	9	12	9	0.61	0.13	0.03		

Таблица П4. Описательная статистика переменных для расчета запасов углерода объектов Москворецко-Окской равнины

	Среднее		Ст. отклонение		Мин		Макс		n		p	
	МО1	МО2	МО1	МО2	МО1	МО2	МО1	МО2	МО1	МО2	МО1	МО2
Слой FH подстилки												
С _{общ} , %	11.4	17.3	3.7	8.8	1.3	4.6	1.3	5.1	20	16	0.013	0.013
Запас, г/м ²	92.2	621.6	22.0	426.2	0.6	34.0	1.1	39.1	2	16	0.105	0.105
Горизонт А												
С _{общ} , %	3.1	3.8	0.7	1.4	1.8	2.5	5.5	8.0	29	18	0.040	0.040
Плотность, г/см ³	0.9	1.0	0.2	0.2	0.6	0.6	1.1	1.4	21	21	0.024	0.024
Горизонт EL												
С _{общ} , %	0.7	0.8	0.2	0.3	0.4	0.3	1.2	1.6	29	18	0.187	0.187

Плотность, г/см ³	1.3	1.3	0.0	0.04	1.2	1.2	1.3	1.3	11	9	0.251	0.251
Горизонт ВТ												
С _{общ} , %	0.2	0.4	0.03	0.3	0.2	0.2	0.3	1.0	29	18	0.001	0.001
Плотность, г/см ³	1.3	1.3	0.01	0.03	1.3	1.2	1.3	1.3	11	9	0.004	0.004

Таблица П5. Описательная статистика переменных для расчета запасов углерода объектов Брянского Полесья

	Среднее			Ст. отклонение			Мин			Макс			n			p		
	БП1	БП2	БП3	БП1	БП2	БП3	БП1	БП2	БП3	БП1	БП2	БП3	БП1	БП2	БП3	БП1	БП2	БП3
Слой FH подстилки																		
С _{общ} , %	42.9	31.5	30.1	4.9	6.1	7.7	30.0	22.7	18.1	47.1	44.9	45.6	16	16	21	0.00	0.10	0.00
Запас, г/м ²	1841. 2	1518. 5	958. 9	612. 7	862. 7	393. 9	859. 3	384. 8	443. 0	3025. 7	3289. 8	1931. 3	13	13	30	0.00	0.17	0.00
Горизонт А																		
С _{общ} , %	1.9	4.6	2.9	0.7	2.0	1.0	0.8	1.1	1.5	3.5	6.9	4.6	16	16	21	0.00	0.00	0.52
Плотность, г/см ³	1.2	1.0	1.1	0.2	0.2	0.2	1.0	0.8	0.6	1.5	1.3	1.6	13	13	30	0.00	0.05	0.32
Горизонт Е																		
С _{общ} , %	0.5	0.3	0.2	0.1	0.1	0.1	0.3	0.1	0.1	0.7	0.5	0.6	16	16	21	0.00	0.17	0.00
Плотность, г/см ³	1.1	1.2	1.7	0.2	0.06	0.2	1.0	1.1	1.2	1.5	1.3	2.0	7	7	12	0.00	0.03	0.00
Горизонт ВF																		
С _{общ} , %	0.4	0.3	0.2	0.1	0.1	0.1	0.3	0.1	0.1	0.5	0.6	0.5	16	16	23	0.00	0.03	0.00
Плотность, г/см ³	1.2	1.1	2.0	0.2	0.13	0.1	1.0	0.8	1.8	1.6	1.3	2.4	7	7	12	0.03	0.00	0.00

Таблица П6. Объем выборки для статистической обработки данных

Переменные	СЗК			МО		БП		
	СЗК1	СЗК2	СЗК3	МО1	МО2	БП1	БП2	БП3
<i>Гранулометрический состав почвообразующих пород</i>								
Доля частиц <2 мкм (%)	3	3	3	6	3	3	3	3
<i>Растительность</i>								
Проективное покрытие яр.С (%), ВН, ВН1, ВН2	55	58	57	14	8	11	11	39
Запасы древесины (т/га)	3	3	3	6	3	3	3	3
<i>Характеристика L подгоризонта подстилки</i>								

CH (%), C/N, pH, N (%)	18	18	21	29	18	16	16	21
<i>Запасы углерода (т/га)</i>								
FH, Cst	30	36	33	8	16	22	22	39
0-30 см, 30- 50 см, Cst	30	36	33	39	30	22	22	39