

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов им. А.С. Исаева
Российской академии наук

На правах рукописи



Гичан Дмитрий Владимирович

**ВЛИЯНИЕ РАСТИТЕЛЬНОСТИ НА ПОТОКИ И ЗАПАСЫ УГЛЕРОДА
В ПОЧВАХ ПОСТАГРОГЕННЫХ ЭКОСИСТЕМ ВОЛОГОДСКОЙ
ОБЛАСТИ**

4.1.6 – Лесоведение, лесоводство, лесные культуры, агролесомелиорация,
озеленение, лесная пирология и таксация

Диссертация на соискание ученой степени

кандидата биологически наук

Научный руководитель
Кандидат биологических наук
Тебенкова Дарья Николаена

Москва — 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ СОКРАЩЕНИЙ.....	4
ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	14
1.1 Текущие оценки запасов углерода почвы постагрогенных экосистем	14
1.2 Экосистемные механизмы влияния растительности на запасы почвенного углерода.....	17
1.2.1 Влияние растительности на запасы почвенного углерода через опад	19
1.2.2 Регулирование растительностью потока растворенного органического углерода.....	24
1.2.3 Эмиссия CO ₂ из почв как характеристика влияния растительности на запасы почвенного углерода	30
Выводы к главе 1	36
ГЛАВА 2. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ	39
2.1 Район исследования	39
2.2 Объект исследования	41
2.3 Методы исследования.....	46
ГЛАВА 3. СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ПУЛОВ УГЛЕРОДА.....	56
3.1 Экосистемные запасы углерода.....	56
3.2 Запас углерода фитомассы	57
3.3 Запас углерода мортмассы	58
3.4 Запас углерода почв	59
Выводы к главе 3	61
ГЛАВА 4. ПОСТУПЛЕНИЕ УГЛЕРОДА С РАСТИТЕЛЬНЫМ ОПАДОМ .	62
4.1 Концентрация углерода, азота и отношение C/N растительного опада.....	62
4.2 Поток углерода с опадом.....	64
4.3 Месячная динамика поступления углерода с опадом	67
Выводы к главе 4	69
ГЛАВА 5. ЭМИССИЯ CO₂ ИЗ ПОЧВ.....	71

5.1 Поток CO ₂ из почв за вегетационный период	71
5.2 Влияния влажности почвы и температуры на эмиссию CO ₂	74
Выводы к главе 5	75
ГЛАВА 6. ПОТОКИ РАСТВОРЕННОГО ОРГАНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА	77
6.1 Объемы атмосферных выпадений и лизиметрических вод	77
6.2 Концентрации растворенного органического углерода в атмосферных выпадениях и лизиметрических водах.....	81
6.3 Сезонная динамика концентрации растворенного органического углерода в атмосферных выпадениях и лизиметрических водах.....	83
6.4 Потоки растворенного органического углерода с атмосферными выпадениями и лизиметрическими водами	86
6.5 Сезонная динамика потоков РОУ.....	89
Выводы к главе 6	91
ГЛАВА 7. ИНФОРМАТИВНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ВЛИЯНИЯ РАСТИТЕЛЬНОСТИ НА ЗАПАСЫ ПОЧВЕННОГО УГЛЕРОДА	93
7.1 Поступление углерода с растительным опадом и его качественные характеристики	93
7.2 Поступление РОУ с атмосферными выпадениями.....	96
7.3 Эмиссия CO ₂ из почв	97
7.4 Вынос РОУ с лизиметрическими водами.....	98
7.5 Оценка совместного влияния информативных показателей и их вклада в вариацию запасов ПОУ.....	98
Выводы к главе 7	100
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	102
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	106
Приложение А	141
Приложение Б	144
Приложение В	145
Приложение Г	146

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ СОКРАЩЕНИЙ

БГЦ – биогеоценоз

ПОУ – углерод в составе почвенного органического вещества

РОУ – углерод в составе растворенных органических соединений

r – коэффициент корреляции

CV – коэффициент вариации

R^2 – коэффициент детерминации

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность исследования.

Адаптация к климатическим изменениям – один из наиболее актуальных вызовов современности, поиск решений которого оказывает значительное влияние на политические и управленческие решения во всем мире (Стратегия..., 2021; African ..., 2022; The Working Guidance ..., 2021). Перед Россией стоит амбициозная задача – достижение баланса между антропогенными выбросами парниковых газов и их поглощением не позднее 2060 года, при этом объем поглощения парниковых газов экосистемами лесного фонда должен быть не менее 1200 млн т CO₂ экв. (327,9 млн. т С) (Стратегия..., 2021). Одним из путей к достижению углеродной нейтральности может стать вовлечение земель, выбывших из сельскохозяйственного использования в природно-климатическую деятельность.

В России площади постагрогенных экосистем, покрытых древесно-кустарниковой растительностью, оценивается от 30 до 100 млн. га (Люри, 2010; Барталев, 2023; Гичан, Тебенькова, 2023; Ярошенко, 2025). Из них 13,2 млн. га перспективны для вовлечения в сельскохозяйственный оборот (Постановление правительства..., 2021). Для остальных постагрогенных экосистем требуется разработка экономически обоснованных стратегий землепользования. По экспертным оценкам, сохранение лесов и выращивание новых быстрорастущих насаждений на таких территориях позволит в перспективе обеспечить дополнительный прирост до 300 млн. м³ хозяйственно ценной древесины в год и получить дополнительный объем поглощения парниковых газов в размере около 400 млн. т CO₂ в год (Резолюция ..., 2021; Ярошенко, 2025; Резолюция ..., 2026).

Для реализации и верификации природно-климатических проектов важно проводить достоверную оценку всех пулов углерода – фитомассы, мортмассы, подстилки и минеральных горизонтов почв, поскольку недоучет может приводить к формированию ложных углеродных единиц (Michaelowa et al., 2019). Комплексные оценки запасов углерода на постагрогенных землях малочисленны (Владыченский и др., 2013; Карелин и др. 2017; Курганова и др., 2022; Наквасина,

Шумилова, 2021) и не охватывают всего разнообразия почвенных условий таких территорий. В частности, отсутствуют данные для дерново-подзолистых остаточно-карбонатных почв: они занимают небольшую площадь (не более 90 тыс. км²), но отличаются высоким плодородием за счет формирования на карбонатной морене и большому содержанию кальция в почвенном поглощающем комплексе, по сравнению с бескарбонатными почвами (Шоба и др., 2011). Кроме того, не проведен сравнительный анализ размеров пулов углерода, между луговыми и лесными экосистемами на таких почвах, что позволило бы оценить их углероддепонирующий потенциал.

Реализация природно-климатических проектов невозможна без понимания механизмов, влияния растительности на экосистемные процессы, которые определяют формирование запасов углерода в составе почвенного органического вещества (далее – почвенный органический углерод, ПОУ) на постагрогенных землях России. Очевидно, что при смене растительных сообществ меняются физические (Баева и др., 2017; Рыбакова, Сорокина, 2023), водные (Zhao et al., 2022) и химические свойства (Телеснина, 2021) почв, температурный режим (Мелехов, 1980; Каверин и др., 2019), происходит перераспределение атмосферных выпадений кронами древостоев (для лесов – Лукина, Никонов, 1998; Кузнецова и др., 2022, Michel et al., 2025), меняются качественные и количественные характеристики органического вещества поступающего в почву с растительным опадом (Лукина и др., 2021; Басова и др., 2022; Иванова, 2023), что в свою очередь влияет на процессы разложения и миграцию углерода в профиле почвы (Vani et al., 2018; Иванова, 2023). Однако, до настоящего времени комплексные исследования с учетом не только пулов, но и потоков углерода, на постагрогенных землях России не проводились. Для биогеоценозов (далее – БГЦ) сформировавшихся на неиспользуемых сельскохозяйственных землях слабо изучены потоки поступления углерода с растительным опадом, отсутствуют данные о поступлении и миграции углерода в составе растворенных органических соединений (далее – растворенный органический углерод, РОУ).

Разработанность темы исследования.

Значительное количество отечественных и зарубежных исследований постагрогенных экосистем посвящено оценке динамики пулов углерода в процессе зарастания земель древесно-кустарниковой растительностью (Данилов и др., 2018; Мошкина и др., 2019; Леднёв, Дмитриев, 2021; Дмитриев, Леднёв, 2023; Tikhonova et al., 2025). Часть из них посвящена оценке пула почвенного углерода на территории южной тайги европейской части России (Люри, 2010; Чалая, 2012; Телеснина и др., 2021; Курганова и др., 2022). Изучено изменение пула углерода для подзолистых и дерново-подзолистых почв (Телеснина и др., 2017), для агроземов и подзолов (Люри и др., 2010) при постагрогенной сукцессии. В ходе этих исследований показано, что запасы углерода в почве изменяются по направлению к среднему уровню углерода зонального типа почв, при этом они могут как увеличиваться (Чалая, 2012; Курганова и др., 2021), так и уменьшаться (Люри 2010; Романовская, 2012) в зависимости от типа растительных сообществ, окультуренности и нативных свойств почв. Для экосистем южной тайги с дерново-подзолистыми остаточно-карбонатными почвами отсутствуют оценки запасов почвенного углерода, однако, имеются единичные оценки для подзоны средней тайги (Наквасина, Шумилова, 2021).

Смена типа растительных сообществ при зарастании постагрогенных земель приводит к кардинальным изменениям в функционировании экосистемы, что в свою очередь влияет на потоки углерода и, как следствие, на запасы углерода почв (Курганова и др., 2021, 2023). Для постагрогенных экосистем наиболее хорошо изучен процесс почвенного дыхания (Романовская, 2008; Курганова, 2010; Чалая, 2012; Карелин, 2017; Суховеева и др., 2023). Есть единичные исследования размера поступления углерода с растительным опадом (Телеснина и др., 2019). Совершенно не оценен вклад поступления углерода с атмосферными выпадениями и миграции с почвенными водами. При этом все процессные исследования проводились в отрыве друг от друга в различных постагрогенных экосистемах, что не позволяет провести комплексную оценку влияния растительности на экосистемные процессы, определяющие формирование запасов ПОУ. Несмотря на наличие

данных о дыхании почвы (Кудеяров, 1995; Замолодчиков, 2003; Курганова, 2010; Осипов, 2023), поступлении опада (Ведрова, 2011; Пристова и др., 2011; Болдескул и др., 2015; Бобкова, Кузнецов, 2022), поступлении углерода с атмосферными выпадениями и миграция с почвенными водами (Лукина, Никонов, 1998; Аржанова, Елпатьевский, 2005; Шильцова, Ласточкина, 2006; Султанбаева и др., 2015; Кожевникова и др., 2017; Кузнецова и др., 2022) для земель лесного фонда, их аппроксимация на постагрогенные экосистемы невозможна в связи с формированием более продуктивных древостоев на неиспользуемых сельскохозяйственных землях, обусловленной относительно высоким плодородием почв (Zomer et al., 2016).

Цель диссертации – оценить влияние лесной и луговой растительности на потоки и запасы углерода в дерново-подзолистых остаточно-карбонатных почвах постагрогенных биогеоценозах Вологодской области.

Задачи исследования:

1. Дать сравнительную оценку запасов углерода в дерново-подзолистых остаточно-карбонатных почвах луговых и мелколиственных постагрогенных биогеоценозов.

2. Дать сравнительную оценку потоков углерода в постагрогенных луговых и мелколиственных биогеоценозах, включая: (1) поступление углерода в почву с растительным опадом и атмосферными выпадениями; (2) вынос углерода с почвенными водами и эмиссией CO₂ из почв.

3. Выявить информативные показатели потоков, определяющие различия почвенных пулов углерода постагрогенных луговых и мелколиственных биогеоценозов.

4. Оценить вклад растительности в варьирование запасов углерода в постагрогенных дерново-подзолистых остаточно-карбонатных почвах Вологодской области.

Научная новизна диссертации.

1. Показано, что растительные сообщества влияют на пулы углерода в дерново-подзолистых остаточно-карбонатных почвах постагрогенных экосистем, определяя потоки углерода:

- поступление растительного опада, (включая качественные и количественные характеристики),
- поступление РОУ с атмосферными выпадениями в вегетационный период (май, июль),
- вынос РОУ с почвенными водами в сентябре,
- эмиссию CO₂ в осенний период (сентябрь, октябрь).

2. Установлено, что влияние растительности на вариацию запасов углерода подстилки в луговых и мелколиственных постагрогенных экосистемах Вологодской области обусловлено показателями процессов разложения органического вещества, включая концентрацию N в растительном опаде (31 % вариации) и почвенное дыхание в октябре (28 %), а также размерами поступления РОУ с атмосферными выпадениями в мае (16 %).

3. Показано, что значительный вклад в вариацию запасов углерода старопахотной толщи постагрогенных экосистем вносят процессы поступления органического вещества, включая размеры поступления РОУ с атмосферными выпадениями в мае (15 %) и поступления углерода с растительным опадом (13 %). При этом поток углерода с дыханием почвы в октябре обуславливает 13 % вариации.

4. Показано, что мелколиственные БГЦ характеризуются более эффективной фиксацией РОУ в горизонте подстилки и старопахотной минеральной толще почвы, по сравнению с луговыми. В березняках поступление РОУ с атмосферными выпадениями преобладает над его выносом с почвенными водами в среднем на 22 кг С/(га год), в то время как из луговых экосистем с вертикальным стоком РОУ в иллювиальный горизонт почвы выносятся 17 кг С/(га год).

Практическая значимость и теоретическая значимость работы.

Диссертация направлена на решение задач, относящихся к одному из важнейших приоритетов научно-технологического развития Российской Федерации: «Объективная оценка выбросов и поглощения климатически активных веществ, снижение их негативного воздействия на окружающую среду и климат, повышение возможности качественной адаптации экосистем, населения и отраслей экономики к климатическим изменениям». Натурные оценки могут быть использованы для обновления конверсионных коэффициентов в Национальном кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, развития моделей динамики запасов углерода и поглощения выбросов парниковых газов на постагрогенных землях южной тайги.

Полученные оценки могут использоваться для прогноза динамики экосистемных функций и услуг лесов в условиях комбинированного влияния природных и антропогенных факторов. Полученные результаты подтверждают целесообразность включения неиспользуемых сельскохозяйственных территорий в учет поглощения парниковых газов в Национальном кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов.

Выявленные информативные показатели влияния растительности на пул почвенного углерода могут быть использованы для принятия эффективных управленческих решений в области лесного и сельского хозяйства, в том числе с целью реализации природно-климатических проектов.

Защищаемые положения диссертации:

1. Растительность определяет динамику потоков углерода в постагрогенных луговых и мелколиственных экосистемах: поступление с растительным опадом (включая качественные и количественные характеристики опада), размеры поступления и выноса РОУ и эмиссию парниковых газов из почв.

2. Растительность определяет вариацию запасов углерода подстилки и старопахотной толщи 0 – 30 см дерново-подзолистых остаточно-карбонатных почв постагрогенных луговых и мелколиственных БГЦ за счёт формирования и регулирования потоков углерода.

3. Информативными показателями потоков углерода, определяемых типом растительных сообществ, которые влияют на пулы углерода в дерново-подзолистых остаточно-карбонатных почвах постагрогенных экосистем, являются размеры поступления и качество (концентрация N, отношение C/N) растительного опада, размеры поступления РОУ с атмосферными выпадениями в вегетационный период, размеры выноса РОУ с почвенными водами в иллювиальный горизонт и эмиссиями CO₂ из почв осенью.

4. Наибольший вклад в вариацию запасов углерода в подстилке и старопахотной толще вносят качественные и количественные характеристики опада, поступление РОУ в мае, почвенное дыхание в октябре.

Степень достоверности и апробация результатов исследования.

Достоверность результатов исследования обеспечивается значительным объемом экспериментального материала, собранного в течении трех лет мониторинга на 19 пробных площадях, исследования на которых проводились в соответствии с общепринятыми методами лесной таксации, почвоведения, геоботаники. Анализ данных учитывал межгодовую, межсезонную и внутрипространственную вариабельность исследуемых показателей. Лабораторные исследования выполнены в Экоаналитической лаборатории ИБ Коми НЦ УрО РАН, аккредитованной в системе Росаккредитации. Обоснованность полученных результатов подтверждена соответствующими статистическими критериями.

Основные результаты работы представлены и обсуждены на семинарах ЦЭПЛ РАН (Москва, 2022 – 2026), X Всероссийской научной конференции (с международным участием), посвященной памяти Розалии Михайловны Морозовой (1928 – 2017) «Актуальные вопросы теории и практики лесного почвоведения» (Петрозаводск, 2023), XXXI Всероссийской молодежной научной конференции (с элементами научной школы) «Актуальные проблемы биологии и экологии» (Сыктывкар, 2024), XXXI Всероссийской научной конференции (с международным участием) «Продуктивность лесов в условиях меняющегося климата» (Петрозаводск, 2024), IX съезде Общества почвоведов им. В.В. Докучаева (Казань,

2024), Отчетной конференции ЦЭПЛ РАН «Углерод в наземных экосистемах: мониторинг» (Москва, 2024, 2025), X Всероссийской научно-технической конференции «Леса России: политика, промышленность, наука» (Санкт-Петербург, 2025), XI Всероссийской научной конференции с международным участием, посвященной памяти Н. В. Орловского (1899—1986 г.г.) «Экологические функции лесных почв и биоразнообразие лесов» (Красноярск, 2025).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 12 печатных работ, в том числе 4 из перечня ВАК (2 статьи в журналах 1 уровня «Белого списка», 1 статья в журнале 3 уровня «Белого списка», 8 тезисов докладов на всероссийских (с международным участием) и национальных научных конференциях). Зарегистрирована 1 база данных.

Личный вклад автора. Автор принимал непосредственное участие в полевых исследованиях пулов и потоков углерода. Им лично проведена статистическая обработка полученных данных и интерпретация результатов.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения; семи глав, заключения, списка литературы. Общий объем диссертации 147 страниц, включая 12 таблиц, 28 рисунков. Список использованной литературы содержит 297 наименований, в том числе 151 на иностранном языке.

Благодарности: Автор выражает искреннюю благодарность своему научному руководителю Тебеньковой Д.Н. за руководство исследованиями и содействие на всех этапах работы; а также коллективу ЦЭПЛ РАН за помощь научного, технического, организационного характера, в частности: Ершову Д.В., Беловой Е.И., Гаврилюку Е.А. за помощь в подборе опытных участков; Горнову А.В., Шевченко Н.Е., Ручинской Е.В. за работу с геоботаническим материалом; Ивановой В.Н. за помощь в обработке почвенных данных; специалистам молодежной лаборатории, которые принимали участие в полевых исследованиях (Катаеву А.Д., Никитиной А.Д., Колычевой А.А., Коротковой Н.В., Аргеткиной С.А.); консультантам Лукиной Н.В. и Кузнецовой А.И. за ценные советы, которые помогли улучшить качество работы. Отдельная

благодарность АО Апатит в лице Демидова Д.В. и Шараповой Н.Р. за советы, консультации и содействие на всех этапах работы.

Работа выполнена при финансовой поддержке АО Апатит в рамках работы Лаборатории климаторегулирующих функций лесов ЦЭПЛ РАН, тема НИР "Биоразнообразие и климаторегулирующие функции лесов" (регистрационный номер 125112813543-4).

ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ

1.1 Текущие оценки запасов углерода почвы постагрогенных экосистем

Почва является одним из важнейших компонентов экосистем, который обеспечивает существование многих форм растительных и животных организмов, регулирует биогеохимические циклы, а также химический и гидрологический состав атмосферы и гидросферы (Добровольский и др., 2003, Богатырёв, Погожева, 2014). К тому же она является одним из крупнейших пулов углерода. Общий запас углерода в метровом слое почв мира оценивается в 1500 Гт (Nieder, 2008). По разным оценкам в лесных сообществах доля почвенного углерода может составлять 30 – 60 % от общего запаса углерода экосистемы (Lal, 2008; Framstad et al., 2013).

Заращение неиспользуемых сельскохозяйственных земель сопровождается прекращением антропогенной нагрузки и сменой растительных сообществ, что в свою очередь ведет к изменению физических и химических свойств почвы (Гульбе, 2009; Новикова, Полозова, 2009; Vaetten et al., 2010; Лиханова, 2012; Москаленко, Бобровский, 2014; Телеснина, 2014). Накоплено значительное количество материала, посвящённого изучению динамики запасов ПОУ для различных типов постагрогенных почв, среди которых: агросерые и серые лесные почвы (Баева и др., 2017; Телеснина и др., 2017), подзолистые почвы (Мошкина и др., 2019), агроземы альфегумусовые иллювиально-железистые и дерново-подбуры оподзоленные (Дубровина и др., 2022) и т.д. Важно отметить, что большая часть существующих исследований не учитывает значительные запасы ПОУ в нижних горизонтах. По разным оценкам запасы ПОУ в слое 50 – 100 см могут составлять от 9 до 33 % от запасов метрового слоя почвы (Лукина и др., 2018; Дубровина и др., 2022). Превалирующее большинство исследований посвящено изучению постагрогенных дерново-подзолистых почв, которые широко распространены на территории южной тайги (Люри, 2010; Чалая, 2012; Мошкина и др., 2019; Леднев, Дмитриев, 2021; Телеснина и др., 2021; Курганова и др., 2022; Дмитриев, Леднёв, 2023).

Древостои на постагрогенных территориях более продуктивны, чем древостои на землях лесного фонда, что приводит к накоплению большего количества углерода в фитомассе (Zomer et al., 2016). Первичная продуктивность древостоев значимо влияет на аккумуляцию почвенного углерода, главным образом за счет поступления растительного опада и опада (Post, Know, 2000; Иванова, 2021; Басова и др., 2022). В метаанализе (Guo, 2002) было показано, что при зарастании сельскохозяйственных земель лесной растительностью, от стадии пашни до формирования вторичных лесов запасы ПОУ увеличиваются вдвое (Guo, 2002).

Среднемировые темпы накопления почвенного углерода на зарастающих постагрогенных ландшафтах составляют 0,4 т С/(га год) (Post, Know, 2000). В России в течение первых 20 лет этот показатель может превышать 1,05 т С/(га год) (Kurganova et al., 2014). Скорость накопления углерода для слоя почв 0 – 20 см достигает максимальных значений в первые 15 лет после прекращения сельскохозяйственного использования и составляет от 1,3 т С/(га год) в дерново-подзолистых и серых лесных почвах до 1,7 т С/(га год) в черноземах (Kurganova et al., 2010; Кудеяров, 2015). Со временем к возрасту 30-летней залежи скорость накопления снижается до 0,4 т С/(га год) в дерново-подзолистых почвах и черноземах и до 0,6 т С/(га год) в серых лесных почвах. Выявленная закономерность объясняется интенсивной секвестрацией углерода в первые годы формирования БГЦ и постепенным насыщением почвы органическим веществом к моменту формирования сомкнутого молодого древостоя. Следовательно, динамика накопления ПОУ зависит от типа почвы и времени, прошедшего с момента прекращения сельскохозяйственной деятельности. В исследовании (Шпедт и др., 2014) для постагрогенных БГЦ отмечается корреляция динамики запасов ПОУ с показателями тепло- и влагообеспеченности ($r = 0,73$). Тип растительности и направленность сукцессии также влияют на скорости аккумуляции почвенного углерода, например, темпы накопления в дерново-подзолистых постагрогенных почвах южной тайги могут достигать 0,9 и 2,4 т С/(га год) в луговых и лесных экосистемах соответственно (Романова и др., 2024).

В подзоне средней тайги в процессе постагрогенного восстановления экосистем наблюдаются изменения физических и химических показателей почв. Отмечается тенденция к снижению плотности и концентрации углерода в почвах при переходе от пашни к спелым лесам, что приводит к уменьшению общих запасов углерода как в старопахотном (Наквасина и др., 2021), так и в метровом (Дубровина и др., 2022) слое почвы почти в 2 раза. Тем не менее, в течение первых десятилетий после выведения земель из эксплуатации не фиксируется ухудшение агрохимических свойств постагрогенных почв и существенное снижение запасов углерода (Данилов и др., 2018). Более того, в ряде случаев наблюдается даже положительная динамика, проявляющаяся в увеличении содержания органического вещества (Дричко и др., 2015; Наквасина и др., 2021).

В подзоне южной тайги запасы ПОУ в старопахотной толще увеличиваются на 22 – 48 % (Кечайкина и др., 2011; Владыченский и др., 2013; Телеснина и др., 2017; Курганова и др., 2022; Курганова и др., 2023; Дмитриев, Леднев., 2023) и на 25 – 29 % для метровой толщи (Рыжова и др., 2014; Комарова, 2018). Пик запасов ПОУ приходится на стадию сомкнутого пионерного древостоя (15 – 20 лет), при этом такие значения в среднем на 23 % выше, чем значения запасов для старовозрастных лесов (Владыченский и др., 2013; Рыжова и др., 2014; Телеснина и др., 2017; Комарова, 2018; Дмитриев, Леднев, 2023). При восстановлении зонального типа леса (сосняк чернично-зеленомошный) на агроземях запасы ПОУ в 1,3 раза меньше, чем на стадии луговой залежи (Терехова и др., 2023). В районах с высокой степенью окультуренности почв наблюдается снижение запасов углерода в почве к возрасту молодого древостоя на 18 и 38 % в слоях 0 – 20 и 0 – 50 см соответственно, с последующим увеличением по мере развития древостоя (Романовская и др., 2012; Люри, 2013).

Восстановление залежных земель в подзоне хвойно-широколиственных и широколиственных лесов также характеризуется увеличением запасов ПОУ в старопахотной толще, на 23 – 67 % (Рыбакова, Сорокина, 2013; Телеснина и др., 2017; Овсепян, 2018; Таллер и др. 2019; Курганова, 2023; Романова и др., 2024; Латыпова, 2024). Авторы подчеркивают, что вариабельность динамики запасов

ПОУ слабо зависит от типа почвы или географических условий. В исследованиях, где на стадии пашни запасы углерода в почве превышали 50 т С/га отмечается уменьшение запасов ПОУ в первые 20 лет после прекращения сельскохозяйственного использования (Карелин и др., 2017; Курганова и др., 2022).

1.2 Экосистемные механизмы влияния растительности на запасы почвенного углерода

Биогеохимический цикл углерода в лесных и луговых экосистемах представляет собой многоуровневую систему взаимодействий между атмосферой, растительностью, животными, почвой и абиотическими факторами среды (например, климатом). В рамках этой системы формируются пулы и потоки углерода (Базилевич, Титлянова, 2008). Растения поглощают атмосферный CO_2 в процессе фотосинтеза (рисунок 1.1). Часть этого углерода аккумулируется в биомассе (листья, стебли, корни), а другая часть возвращается обратно в атмосферу при дыхании автотрофов. В ходе онтогенетического развития растений образуется опад, в том числе корневой, и отпад – валеж, которые формируют горизонт подстилки, что обеспечивает миграцию углерода из фитомассы в почву. Корневые системы растений также обеспечивают поступление и миграцию углерода в виде экссудатов и посредством деятельности симбиотических микроорганизмов ризосферы (Lorenz, 2010).

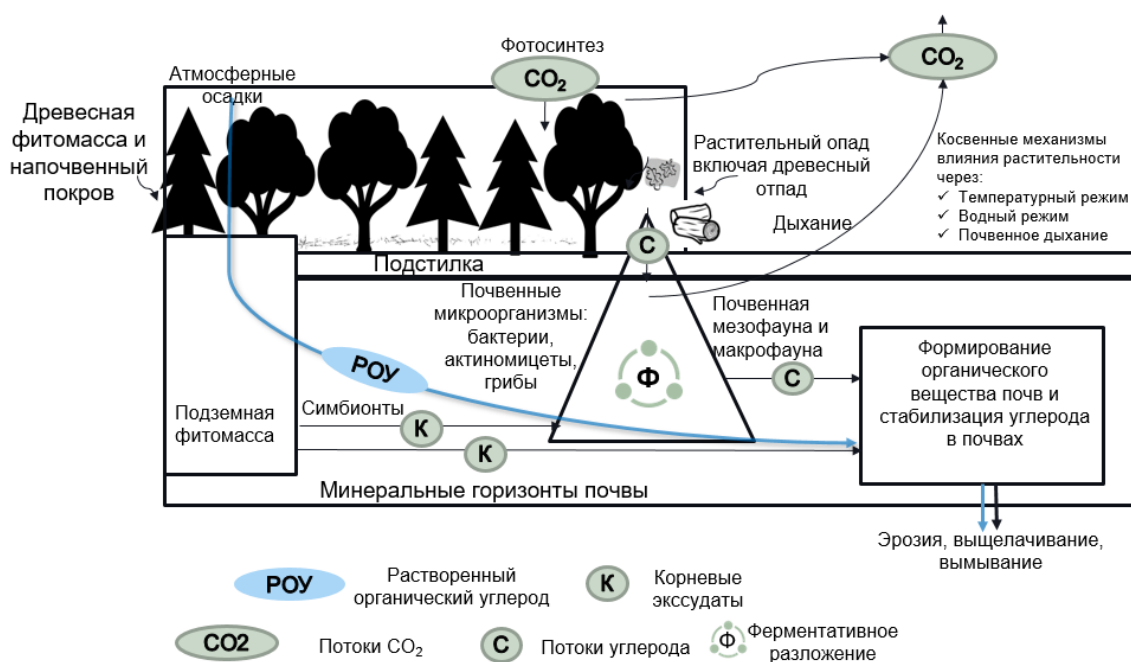


Рисунок 1.1 – Поток углерода в лесной экосистеме по (Mayer et al., 2020) с изменениями

Ещё одним путём переноса углерода в почву служит поступление РОУ с атмосферными выпадениями. Обогащение атмосферных выпадений происходит за счет вымывания органических веществ с органов растений и подстилки, с последующей миграцией в минеральные почвенные горизонты. Поток РОУ в почве сопровождается двумя разнонаправленными процессами: с одной стороны, происходит выщелачивание и вынос углерода из почв в речную сеть, с другой – лабильный углерод в составе РОУ может переходить в стабильные формы. Микроорганизмы выделяют ферменты, расщепляющие органическое вещество на более простые соединения, что приводит к образованию микробной биомассы, метаболитов и некротомассы почвенной биоты и формирует потоки углерода (Haddix et al., 2016; Paul, 2016). Лабильный углерод может как перейти в состав стабильного органического вещества, связываясь с минеральными частицами (Miltner et al., 2012; Chenu et al., 2015; Paul, 2016) и почвенными агрегатами (Sollins et al., 2006) или осажаясь в микропорах (Mayer et al., 2020), так и мигрировать в составе почвенного раствора. Совокупность рассмотренных процессов трансформации углерода в почве сопровождается выделением CO₂ – почвенным дыханием (Кобак, 1988; Xu, Shang, 2016).

В исследовании (Кузнецова, 2021) для лесных БГЦ выделяются три механизма прямого влияния растительности на запасы ПОУ: 1) формирование и трансформация надземного и подземного опада, а также отпада; 2) вертикальная стратификация корней деревьев, выделение корневых экссудатов и связанная с ними деятельность ризосферы; 3) выщелачивание РОУ из живых растений и лесной подстилки. Косвенное влияние растительности на потоки углерода осуществляется через регулирование микроклимата (формирование водного и температурного режима) и почвенных микробных сообществ (их таксономической структуры, биомассы и разнообразия (Daal et al., 2008; Brechet et al., 2009; Chen et al., 2019; Vicena et al., 2022; Chenu, et al., 2024).

1.2.1 Влияние растительности на запасы почвенного углерода через опад

Формирование и поступление древесного опада находится под влиянием трех групп факторов (Кузнецова и др., 2021; Иванова, 2021; 2022;):

1) Биотических: видовая специфичность доминантов растительных сообществ, сезонная динамика, обусловленная фенофазами растений, продуктивность растительных ассоциаций, мозаичность лесных биогеоценозов, сомкнутость крон, полнота и возраст древостоя и т. д.

2) Абиотических: географическое положение, определяющее климат на глобальном уровне, температурный и гидрологический режим биогеоценоза, высотная поясность, потоки ветров и т. д.

3) Антропогенных: режима землепользования и ведения хозяйственной деятельности.

Объемы поступления растительного опада в значительной степени обусловлены возрастом, биометрическими характеристиками и продуктивностью древостоев (Novak et al., 2014; Собачкин и др., 2017). Например, для березовых молодняков средней тайги поступление опада за 15 лет развития древостоев увеличивается в 3 – 5 раз (Пристова, 2021). Тип леса и видовая специфичность растений также влияют на объем и состав формирующегося древесного опада (Кузнецова и др., 2019, 2021; Лукина и др., 2021; Иванова, 2022; Осипов, 2024).

Другим важным критерием является видовое разнообразие, увеличение которого способствует обогащению фракций растительного опада, а также увеличению его количества за счет более оптимального использования пространства. При прочих равных условиях смешанные древостои отличаются большими поступлением опада по сравнению с чистыми древостоями (Scherer-Lorenzen, 2005).

Сезонная динамика поступления древесного опада тесно связана с фенологией растений, в частности сроками формирования и отмирания листьев или хвои – доминирующими фракциями (Chave et al., 2010). Продуктивность лесных сообществ определяет величину формируемой биомассы и, как следствие, количество опада (Chave et al., 2010; Chen et al., 2017; Feng et al., 2019). Масса поступающего опада и его фракционный состав напрямую связаны с возрастом древостоя (Dolezal et al., 2019; Усольцев и др., 2023). С одной стороны, на ранних этапах формирования древостоя количество опада закономерно увеличивается с возрастом и в момент максимальной продуктивности достигает своего пика (Sprugel, 1984). С другой – увеличение продуктивности древостоев сопровождается снижением полноты в процессе внутривидовой конкуренции, что может нивелировать прирост опада (Решетникова, 2015).

Древесный опад принято разделять по качеству в зависимости от его химического состава и скорости оборота в биогеохимических циклах. Критерии, определяющие качество опада – концентрация азота, углерода, а также различные отношения, такие как C/N, N/P, лигнин/целлюлоза и лигнин/N (Osono, Takeda, 2004; Berg, 2014; Blanco et al., 2023). Содержание и отношения элементов напрямую коррелируют с фракционным составом растительного опада, который в свою очередь обусловлен видовой специфичностью растений (Кузнецова и др., 2019, 2020, 2021; Лукина и др., 2021; Иванова, 2022). Фракции древесного опада могут подразделяться на активную (листья, хвоя, труха, семена) и неактивную (шишки, мелкие ветки, кора) фракции в зависимости от скорости оборота в биогеохимических циклах (Карпачевский и др., 1980). Для березы, осины и клена, произрастающих в зоне хвойно-широколиственных, среднее отношение C/N для

активных фракций составляет 42, для неактивных – 100 (Припутина и др., 2020). В ряде работ подчеркивается, что хвоя сосны имеет более широкие отношения C/N, C/P и N/P по сравнению с хвоей ели (Leonard et al., 2021; Иванова и др., 2023). Лиственный опад в отличие от хвойного характеризуется более высокой начальной концентрацией питательных элементов и меньшим содержанием лигнина и полифенолов, что, в свою очередь, способствует более быстрой начальной скорости разложения листьев по сравнению с хвоей (Prescott, 2002; Bani et al., 2018). В исследовании (Телеснина и др., 2019) на примере постагрогенных сукцессионных рядов в условиях южной тайги было показано, что доля легко разлагаемой фракции опада (листья, почки, цветы) в ивовых молодняках и приспевающих березняках составляет 86 и 90 % соответственно. Для ельников Кольского полуострова было установлено, что содержание фенольных соединений снижается в следующем ряду: листья брусники > листья черники > хвоя ели > листья березы > кора ели > древесина ели (Горбачева и др., 2006).

Растительный опад является одним из основных источников ПОУ (Кузнецова и др., 2021; Лукина и др., 2021). В среднем количество углерода, переходящего от фитомассы через пулы подстилки в почву, составляет 5 – 10 % от его массы в исходном опаде (Замолотчиков, 2011). Качественные и количественные характеристики опада зависят от видовой специфичности растений, что в свою очередь определяет запасы углерода в подстилке. Процессы разложения подстилки, обусловленные качеством опада, играют важную роль для перераспределения органического вещества почвы. В Центре по проблемам экологии и продуктивности лесов им. А.С. Исаева Российской академии наук разрабатывается функциональная классификация лесов по эффективности выполнения ими функции аккумуляции ПОУ. Основа для классификации – качество древесного опада и скорость его разложения (Лукина и др., 2021; Басова и др., 2022). Согласно данной классификации, древесный опад подразделяется на следующие группы: 1) лиственные деревья с быстроразлагаемым опадом (*Acer spp.*, *Fraxinus spp.*, *Tilia spp.*, *Ulmus spp.*, *Betula spp.*, *Alnus spp.*); 2) лиственные деревья с медленноразлагаемым опадом (*Populus spp.*, *Quercus spp.*, *Fagus spp.*); 3)

темнохвойные деревья (*Picea spp.*, *Abies spp.*); 4) светлохвойные (*Pinus spp.*). Исследование Vesterdal et al. (2013) показало, что бук формирует большие запасы углерода в лесной подстилке, чем ясень, клен и липа. Хвойные виды деревьев, такие как сосна, лиственница и тсуга, формируют высокие запасы углерода в подстилке, близкие к буковым лесам. Под мелколиственными видами, такими как береза и тополь, обнаруживаются более низкие запасы углерода в подстилке по сравнению с хвойными лесами. Дубовые леса показывают промежуточные значения запасов. Для подзоны хвойно-широколиственных лесов при поступлении опада светлохвойных видов запасы углерода подстилки больше, чем при поступлении быстроразлагаемого опада мелколиственных деревьев, при этом в минеральных горизонтах наблюдается обратная закономерность (Басова и др., 2022). Для постагрогенного хроноряд южной тайги показано, что от стадии березовых молодняков до формирования зрелого 100-летнего леса происходит увеличение поступления опада и запасов органического вещества в подстилке и старопахотной толще (Телеснина и др., 2017, 2019).

Накоплено значительное количество данных о поступлении углерода с растительным опадом на лесных непостагрогенных землях. Поступление углерода с растительным опадом в ельниках средней тайги может варьировать от 1,2 до 2,8 т С/(га год) в зависимости от типа леса (Бобкова, Кузнецов, 2022). Для приморских чернопихтово-широколиственных лесов поступление опада составляет от 3,2 до 5,4 т С/(га год) (Болдескул и др., 2015). Для исследуемых парцелл поступление опада увеличивается с ростом доли участия широколиственных видов (дуба и граба) в составе древостоя (Болдескул и др., 2015). Для 60 – 90-летних березняков подзоны южной тайги центральной Сибири поступление углерода с опадом составляет от 2,9 до 4,4 т С/(га год) (Ведрова, 2011). Поступление опада в березово-еловом молодняке и осиново-березовом средневозрастном древостое средней тайги составляет 1,3 и 2,8 т С/(га год) соответственно (Пристова и др., 2011). В подзоне хвойно-широколиственных лесов для 40-летних березово-осиновых лесов поступление углерода составляет 2,8 т С/(га год); в смешанных хвойно-мелколиственных лесах – 2,4 т С/(га год)

(Сапронов, 2019). Однако, для лесов, сформированных на постагрогенных территориях, имеются лишь единичные исследования по формированию растительного опада. В исследовании (Телеснина и др., 2019) на примере постагрогенных сукцессионных рядов в условиях южной тайги было показано, что общее количество поступающего древесного опада в чистых древостоях ивы козьей в возрасте 12 лет составляет 2,6 т С/(га год), в березово-осиновых и елово-березовых биогеоценозах – 3,6 т С/(га год).

Анализ зарубежной литературы также указывает на недостаточную изученность вопроса о поступлении растительного опада на неиспользуемых сельскохозяйственных землях. В Нигерии для лесных культур на неиспользуемых сельскохозяйственных землях и лесов, сформированных в результате постагрогенной сукцессии, поступление опада значимо не различалось и составляет от 10,0 до 13,6 т С/(га год) (Salako, Tian, 2001). В данном исследовании древостои в возрасте 10 лет представлены: сенной сямской (*Senna siamea* Lam.), леуценой светлоголовчатой (*Leucaena leucoccephala* Lam.) и акацией тонкоплодной (*Acacia leptocarpa* A.Cunn. ex Benth.). На северо-востоке Индии изучалось изменение поступления растительного опада в ходе постагрогенной сукцессии (Току, Ramakrishnan, 1983). Хроноряд представлен: кустарниками, 10- и 20-летними бамбуковыми лесами и зрелыми широколиственными лесами. Было установлено, что в ходе сукцессии количество опада увеличивается и достигает своего пика в 20-летних бамбуковых лесах, поступление опада для которых составило 10 т С/(га год). Для экосистем пальмовых болот в Бразилии поступление опада составляет от 3,7 т С/(га год) для участков нетронутых лесов и участков с низким уровнем антропогенной нагрузки (включая сельскохозяйственную деятельность) до 2,8 т С/(га год) для участков пальмовых болот, на которых активно ведется сельскохозяйственная деятельность (Sales et al., 2020). Для лесов, сформированных на неиспользуемых сельскохозяйственных землях, предыдущий режим землепользования потенциально может влиять на качественные и количественные характеристики опада. Имеющиеся данные (Гульбе, 2009; Мелехов и др., 2011; Телеснина, 2014; Мошкина и др., 2019) свидетельствуют о

более высоких запасах фитомассы лесов на постагрогенных землях по сравнению с лесами на непостагрогенных землях, что позволяет выдвинуть гипотезу о более интенсивном формировании опада для первых по сравнению со вторыми. Внесение удобрений при прежнем режиме землепользования может влиять на качество опада, регулируя содержание NPK в органах растений (Becker et al., 2015).

1.2.2 Регулирование растительностью потока растворенного органического углерода

Потоки РОУ в лесных и луговых БГЦ играют важную роль в биогеохимическом цикле углерода. Они являются сложным и недостаточно изученным аспектом функционирования наземных экосистем и обусловлены совокупным влиянием множества факторов, таких как: растительность (Prescott, 2002), климат (Davidson, Janssens, 2006), тип почвы (Langeveld et al., 2020).

Растительность оказывает значимое влияние как на объемы РОУ, так и на их химический состав (Лукина, Никонов, 1996, 1998; Лукина и др., 2008). Этот эффект проявляется при прохождении атмосферных выпадений через лесной полог и их последующей миграцией по почвенному профилю. Известны три основных механизма влияния растительности на потоки РОУ: 1) изменение концентраций углерода в атмосферных выпадениях при их прохождении сквозь кроны деревьев и их перехвате пологом леса (Лукина, Никонов, 1998, Шильцова, Ласточкина, 2006; Кожевникова и др., 2017); 2) механизмы удержания влаги и выщелачивания органического вещества в горизонте подстилки, сформированной растительным опадом (Fröberg et al., 2011); 3) влияние корневых систем растений на потоки РОУ в почве, за счет выделения экссудатов (Mueller et al., 2012) и поглощения почвенной влаги (Špulák et al., 2021).

Концентрация РОУ, при прохождении атмосферных выпадений сквозь кроны деревьев изменяется за счет перемещения частиц и аэрозолей с поверхности деревьев; вымывания, выделения и поглощения ионов растительными тканями (Arisci et al., 2012), а также за счёт перемешивания дождевых вод с парами воды, выделяемыми растениями в процессе транспирации (Аржанова, Елпатьевский,

2005; Султанбаева и др., 2015; Кожевникова и др., 2017; Кузнецова и др., 2022). По данным (Кузнецова, 2022) концентрация РОУ в подкроновых водах северо-таежных и хвойно-широколиственных лесов в 9 и 4 раза соответственно больше по сравнению с открытыми пространствами – «окнами». При сравнении разных биогеоценозов установлено, что для луга концентрация РОУ в атмосферных выпадениях в 1,5 – 3 раза ниже по сравнению со зрелым хвойно-мелколиственным лесом (Ходжаева и др., 2024). Видовые характеристики древостоя также оказывают влияние на концентрации РОУ. При прохождении осадков сквозь полог хвойных древостоев обогащение РОУ выше по сравнению с лиственными (Arisci et al., 2012; Кузнецова и др., 2022). Сток атмосферных выпадений по стволу дерева (пристволовые воды) также способствует их обогащению углеродом. На примере Валдайского национального парка для хвойных видов южной тайги было показано, что концентрация РОУ в пристволовых водах в 6,5 раз больше по сравнению с подкроновыми (Гашкина и др., 2020).

Влияние лесного полога на концентрации и потоки РОУ с атмосферными выпадениями находит отражение и в сезонной динамике. Весной, с началом сокодвижения и распусканием листьев, начинают работать механизмы вымывания РОУ с поверхности органов растений. При формировании генеративных органов образуется значительное количество пыльцы, из которой также может вымываться РОУ. Повышенная концентрация РОУ в течение вегетационного периода и его снижение в период покоя подтверждается многими исследованиями (Pan et al., 2010; Verstraeten et al., 2014; Chen et al., 2017; Roig–Planasdemunt et al., 2017). Например, для сосновых и еловых лесов Московской области, отмечено, что самая высокая концентрация РОУ для окон и подкроновых пространств приходится на май и август, в то время как в сентябре – октябре концентрации минимальны (Султанбаева и др., 2015).

Лесные БГЦ оказывают значительное влияние на перераспределение поступающих атмосферных выпадений при их перехвате пологом леса (Пристова, Забоева, 2007; Султанбаева и др., 2015). По разным оценкам величина водоудержания на кронах хвойных древостоев может составлять от 2 до 10 л/м²

(Рахманов, 1981; Поляков, 1984). В исследовании А.А. Онучина (2003) для горных хвойных лесов Сибири было показано, что перехват атмосферных выпадений зависит от объема поступающих выпадений. Так атмосферные выпадения объемом до 2 л/м² полностью перехватываются пологом. Увеличение сомкнутости полога и снижение ажурности способствует меньшему поступлению подкроновых вод (Ершов и др., 2021; Ershov et al., 2023). Такой эффект в значительной степени обусловлен видовой специфичностью лесообразующих видов. Для лесных БГЦ Мурманской области показано, что перехват подкроновых вод в сосняках в 1,5 раза больше, чем в ельниках (Ершов и др., 2021), так как сосна отличается большей ажурностью кроны по сравнению с елью (Мелехов, 1980).

При прохождении атмосферных выпадений через подстилку, происходит выщелачивание углерода и его последующая миграция в нижние почвенные горизонты (Fröberg et al., 2011). На примере хроноряда агродерново-подзолов подзоны южной тайги показано, что под горизонтом подстилки от стадии пашни до формирования старовозрастного (120 лет) елово-березового черничного леса концентрация РОУ увеличивается в 2,6 раза (Курганова и др., 2021). Видовая специфичность древесных растений также оказывает значимое влияние на вымывание РОУ из подстилки. В исследованиях (Fröberg et al., 2011; Кузнецова и др., 2022) показано, что вымывание РОУ из подстилки хвойных древостоев выше, чем из лиственных. Для 40-летних чистых лесных культур в условиях Сибири концентрации РОУ в лизимитрических водах под горизонтом подстилки снижались в ряду кедр > сосна > ель > лиственница > береза > осина от 200 до 30 мг/л (Решетникова, 2015). В подкроновых пространствах северотаежных еловых лесов Кольского полуострова концентрации углерода в растворах почвенных вод под горизонтом LFH в 1,3 раза выше, чем в сосновых, при этом в пристволовых зонах наблюдается обратная закономерность (Лукина, Никонов, 1996, 1998; Лукина и др., 2008; Ershov et al., 2023).

Подстилка обеспечивает перехват и удержание атмосферных выпадений, оказывает значительное влияние на гидрологический режим наземных экосистем (процессы испарения, поверхностного стоки и инфильтрации осадков в

минеральную толщу почвы) и, как следствие, на потоки РОУ (Du et al., 2019; Zhu et al., 2020, Deng et al., 2023). Доля перехвата зависит от объема поступающих атмосферных выпадений, мощности, физических и химических характеристик подстилки, сезонной динамики поступления осадков. В лесных БГЦ перехват атмосферных выпадений подстилкой может составлять до 100 % от количества поступающих осадков (Helvey, Patric, 1965; Tsiko et al., 2012). Для буковых лесов было показано, что перехват осадков подстилкой практически в два раза превышает перехват кронами древостоев (Gerrits et al., 2010). Влагоудерживающая и инфильтрационная способность подстилки напрямую определяется видовой специфичностью лесообразующих видов и фракционным составом опада. Опад лиственных древостоев отличается большей гигроскопичностью по сравнению с хвойным, однако, в связи с высокой скоростью оборота, подстилка лиственных видов характеризуется малой мощностью и удерживает меньшие объемы атмосферных выпадений (Лоскутов и др., 2013). Для биогеоценозов различных типов на северо-востоке Китая было продемонстрировано, что влагоудерживающая способность подстилки увеличивается в ряду широколиственный лес < преобладанием сосны < осиново-березовый вторичный лес < елово-пихтовый лес < лиственные лесные культуры < пастбище (Wei-dong et al., 2011).

Смена растительных сообществ является важным драйвером изменения гидрологического режима. Формирование лесных БГЦ на залежи может способствовать как увеличению, так и снижению внутрипочвенного стока, в зависимости от продуктивности и типа лесорастительных условий (Мелехов, 1980). В метаанализе (Ilstedt et al., 2007) продемонстрировано, что формирование древесных растений на сельскохозяйственных землях в результате облесения или агролесомелиорации способствует увеличению инфильтрационной способности почвы в 3 раза. Для подзоны хвойно-широколиственных лесов вынос почвенных вод в иллювиальный горизонт в 150-летних сосняках оказался в 1,6 – 2,4 раза меньше по сравнению с луговым БГЦ (Ходжаева и др., 2024). При этом березовые древостои способствуют значительному снижению содержания влаги в слое 0 – 20

см почвы, по сравнению с еловыми БГЦ и окнами (Špulák et al., 2021). Потери объемной влажности в слое 0 – 20 см для березняков, ельников и окон составили 3,8 %, 1,5 % и 1,3 % соответственно. Наименьшие значения наблюдались в октябре, а наибольшие – в июне. Различия между березняками и ельниками объясняются физиологическими особенностями строения корневых систем березы и ели, корневая система березы обеспечивает глубокое просачивание воды в минеральные горизонты почвы.

В свою очередь потоки РОУ оказывают значительное влияние на запасы и перераспределение ПОУ в почвенном профиле. Как было рассмотрено ранее, с потоками РОУ происходит миграция органического вещества из подстилки в минеральные горизонты почв. В работе (Marschner, Kalbitz, 2003) отмечается, что РОУ почвенных вод может способствовать сохранению запасов углерода почвы за счет наличия ароматических и гидрофобных структур, оказывающих ингибирующее действие на активность ферментов, участвующих в биодegradации ПОУ. Миграция РОУ в минеральных горизонтах почв может обуславливать два антагонистических процесса, связанных с запасами ПОУ. С одной стороны, может происходить высвобождение физически защищенного ПОУ при разрушении макроагрегатов и органоминеральных комплексов под механическим воздействием корней или при воздействии корневых экссудатов и последующий вынос РОУ в речную сеть (Ilsted et al., 2007, Mueller et al., 2012). Вклад миграции РОУ с почвенными водами для лесов хвойно-широколиственной подзоны составляет 2 % – 14 % от ежегодного накопления углерода в минеральных горизонтах почв (Кузнецова и др., 2022). С другой стороны, лабильный углерод в составе почвенных вод может переходить в стабильные пулы, связываясь с минеральными частицами, почвенными агрегатами или осаждаясь в микропорах (Guggenberger, Kaiser, 2003; Горбачева, Лукина, 2004; Прокушкин и др., 2008). Во многих исследованиях отмечается снижение концентрации РОУ при миграции из горизонта подстилки к иллювиальному горизонту, что указывает на переход углерода из почвенного раствора в стабильные пулы (Прокушкин и др., 2008; Султанбаева и др., 2015; Гашкина и др., 2020).

Глобальное поступление углерода с атмосферными выпадениями составляет 510 млн т С/год (Willey et al., 2000). Глобальный вынос углерода с почвенными водами в речную сеть для наземных экосистем составляет $0,28 \pm 0,07$ млн т С/год (Nakhavali et al., 2021). Потoki РОУ для сосновых лесов Бельгии составляют 17 % от чистой экосистемной продукции (Gielen et al., 2011). На территории России экспериментальные измерения потоков углерода в наземных экосистемах разных типов проводятся точно и результаты этих измерений систематизируются в рамках проекта ВИП ГЗ «Единая национальная система мониторинга климатически активных веществ». Многолетние систематические (более 25 лет) измерения выноса углерода проводятся в северотаежных лесах Мурманской области. Установлено, что концентрация органического углерода в водах из органогенных горизонтов почв на фоновых участках еловых и сосновых лесов составляет от 35,21 мг/л в межкроновом пространстве до 84,74 мг/л в подкroновом (Лукина, Никонов, 1998; Лукина и др., 2008; Ершов, 2021). При этом миграция РОУ из лесной подстилки составляет 95 кг С/(га год), из минерального слоя почвы – 35 кг С/(га год) (Аккумуляция углерода..., 2018). По данным (Бобкова, Кузнецов, 2022) для Республики Коми в ельнике разнотравно-черничном миграция углерода с лизиметрическими водами из подстилки за вегетационный период составляет 156,9 кг С/га, из субэлювиального горизонта – 68,6 кг С/га. Имеются четырехлетние оценки концентрации углерода в почвенных водах в сложных ельниках и смешанных хвойных лесах Московской области. Концентрации РОУ достигают 110 мг/л в хвойных лесах и не превышают 60 мг/л в смешанных елово-березовых БГЦ (Султанбаева и др., 2015). Миграция РОУ с лизиметрическими водами в лесных и луговых экосистемах Московской области составляет 4,4 и 3,8 г С/(м² мес) соответственно в слое 0 – 10 см и 2,8 и 1,8 г С/(м² мес) соответственно в слое 0 – 20 см (Ходжаева и др., 2024). Миграция РОУ из органогенных горизонтов в лесах Брянского полесья для широколиственных лесов составляет 14 кг С/(га год), для сосняков от 35 до 56 кг С/(га год) (Кузнецова и др., 2022). Концентрации РОУ в подстилочных водах 40-летних древостоев основных лесообразующих видов Сибири составляют 30 – 80 мг/л для культур лиственницы, березы, осины и ели,

для лесных культур кедра и сосны концентрации РОУ составляют 251 мг/л и 110 мг/л соответственно (Решетникова, 2015). Миграция РОУ с лизиметрическими водами в лесах дальнего Востока из подгоризонта АО варьирует от 28 г С/м² за сезон вегетации в пихтово-еловых лесах до 21 г С/м² в кедрово-широколиственных (Луценко и др., 2021).

Для постагрогенных земель слабо изучены потоки РОУ и влияние факторов определяющие данные потоки (например, предшествующий режим землепользования). При этом данные территории характеризуются интенсивной динамикой видов и функциональных групп, что делает такие объекты уникальными для изучения влияния растительности на потоки РОУ.

1.2.3 Эмиссия CO₂ из почв как характеристика влияния растительности на запасы почвенного углерода

Дыхание почвы является вторым по величине, после фотосинтеза, потоком углерода между наземной экосистемой и атмосферой (Raich, Potter, 1995; Bond-Lamberty, Thomson, 2010; Xu, Shang, 2016). Общую эмиссию CO₂ из почв принято подразделять на два компонента: 1) дыхание корней и связанную с ними деятельность ризосферы, 2) дыхание почвенных микроорганизмов (Ларионова, 1988; Bond-Lamberty et al., 2004; Кудеяров и др, 2007). Принято считать, что вклад гетеротрофного дыхания (дыхания почвенных микроорганизмов) в общее дыхание почв составляет от 50 % до 65 % (Chen et al., 2019; Tong et al., 2021; Vicena et al., 2022). Оставшаяся доля приходится на корневое дыхание.

Вариабельность почвенного дыхания обусловлена комплексным влиянием биотических, абиотических, почвенных и антропогенных факторов. К биотическим факторам относятся: 1) структурные и количественные характеристики почвенных микроорганизмов (Chen et al., 2019; Tong et al., 2021; Vicena et al., 2022), мезо- и макрофауны (Jennings, Watmough, 2016); 2) параметры, обусловленные влиянием растительного покрова: тип биогеоценоза (Raich, Tufekciogul, 2000; Fu et al., 2013); видовое разнообразие растений (Dias et al., 2010; Chen et al., 2019), их биометрические характеристики и продуктивность (Caprez et al., 2012; Hu et al.,

2024); биомассу и продукты метаболизма корневых систем (Rodeghiero et al., 2005; Chang et al., 2009), а также качественные и количественные характеристики опада (Brechet et al., 2009). Наиболее значимыми абиотическими факторами, влияющим на почвенное дыхание, считаются температура воздуха и почвы, гидрологический режим, включая влажность почвы, количество осадков, испарение (Кудеяров и др., 2007; Kurganova et al., 2010, 2011; Chen et al., 2014; Karelin et al., 2021). Физические и химические характеристики подстилки и минеральных горизонтов почв, такие как: содержание органического вещества и макроэлементов (Teklay et al., 2006; Zhang et al., 2020; Zhuang et al., 2023), кислотность (Zhang et al., 2019), гранулометрический состав (Yang et al., 2019), также могут регулировать почвенное дыхание, но их влияние, как правило, менее выражено. Значимыми антропогенными факторами, регулирующими процессы почвенного дыхания, являются режим землепользования (Chen et al., 2018; Xiao et al., 2021) и методы ведения лесного и сельского хозяйства (Peng et al., 2008). Перечисленные факторы во многом определяют друг друга, формируя как прямые, так и обратные взаимосвязи (Raich, Tufekcioglu, 2000; Kosugi et al., 2007; Panosso et al., 2009; Fu et al., 2013). Наиболее значительно варьировали величины суммарного дыхания дерново-слабоподзолистой почвы на месячном уровне осреднения (коэффициент вариации $CV = 25 \% - 56 \%$), в то время как вариабельность величины годового дыхания почв составляла $20 \% - 22 \%$. В зависимости от типа растительных сообщества пространственная вариабельность почвенного дыхания на дерново-слабоподзолистой почве может составлять до 60% (Курганова и др., 2022). В метаанализе (Chen et al., 2014) был проведен анализ влияния группы факторов: температуры, осадков, физических и химических свойств почвы (содержания С, N, К, Na, Р, отношения С/N, обменной кислотности, плотности, гранулометрический состав и запасы ПОУ), а также характеристик растительности (возраст, высота, густота, индекс листовой поверхности, концентрация углерода в надземной и подземной фитомассе и чистая первичная продукция) на вариацию потоков почвенного дыхания. Результаты показали, что среднегодовая температура оказывает максимальное влияние на дисперсию почвенного дыхания, за ней

следуют годовое количество осадков и запасы ПОУ, суммарное влияние перечисленных переменных объясняет до 50 % вариации эмиссии CO₂ из почв. Кислотность почвы, высота и возраст древостоев, объем поступающего опада и индекс листовой поверхности также выступали в качестве информативных индикаторов, однако, их влияние менее выражено.

Растительность выступает в роли одного из ключевых биотических факторов, определяющих интенсивность как корневого, так и микробного компонентов почвенного дыхания. Анализ исследований почвенного дыхания на территории России, представленный в работе (Курганова, 2010), показывает, что для половины имеющихся результатов тип растительности является значимым предиктором почвенного дыхания. Наиболее выраженные различия в потоках CO₂ из почв наблюдались между лесными и луговыми сообществами на дерново-подзолистых и серых лесных почвах, а также для лесов различного состава на дерново-подзолистых и торфяных почвах. В работе (Shi et al., 2020) при формировании лесов в процессе сукцессии на Лессовом плато в Китае авторы указывают четыре основных механизма влияния растительности, способствующих увеличению скорости почвенного дыхания: увеличение биомассы корней, улучшение структуры почвы и активность микроорганизмов, поступление растительного опада и деятельность ризосферы.

В зонах с умеренным климатом вклад корневого дыхания для широколиственных лесов составляет 41 %, для сосняков – 49 % (Yang et al., 2004). Фитомасса тонких корней характеризуется прямой положительной корреляцией с корневым дыханием (King et al., 2004). Участки с многолетними травами, за счет большей фитомассы мелких корней, характеризуются более высокой скоростью почвенного дыхания по сравнению с участками сельскохозяйственных культур (Tufekcioglu et al., 2001). На основе данных для 245 видов древесных и кустарниковых растений было показано, что дыхание корней положительно коррелирует с концентрацией корневого азота и отрицательно – с плотностью корневой ткани, при этом связь дыхания корня с удельной длиной корня и диаметром корня слабая или даже незначительная (Sun et al., 2021).

Микроорганизмы ризосферы образуют симбиотические связи с древесными растениями, примерами которых могут служить азотфиксирующие актиномицеты рода *Frankia*, формирующиеся на корнях ольхи, облепихи, лоха (Venson and Silvester, 1993; Макурина, Радучева, 2005) или специфичные для деревьев родов *Pinaceae spp.*, *Betulaceae spp.* эктомикоризные грибы (Johnson et al., 2007). В исследовании (Gaitnieks et al., 2008) было установлено, что численность ризосферных микроорганизмов для культур ели на постагrogenных землях превышает аналогичный показатель для территорий лесного фонда практически в два раза.

Качественные и количественные параметры растительного опада играют значимую роль в регуляции интенсивности почвенного дыхания: доступность органического субстрата является критическим фактором для роста микроорганизмов, чья активность, в свою очередь, напрямую определяет эмиссию CO_2 из почв (Raich and Tufekcioglu, 2000; Davidson et al., 2002). Кроме того, установлены тесные связи между потоками CO_2 из почвы и чистой первичной продуктивностью надземных частей деревьев. Высокопродуктивные экосистемы, как правило, формируют большее количество опада (Bārdulis et al., 2023). Аналогичные закономерности также справедливы для биометрических показателей древостоя, таких как высота, диаметр, индекс листовой поверхности (Reichstein et al., 2003; Hibbard et al., 2005). Для низинных тропических лесов было показано, что качество подстилки оказывает значимое влияние на скорость ее разложения и, как следствие, на гетеротрофное дыхание: подстилка высокого качества с быстрой скоростью оборота способствует увеличению гетеротрофного дыхания (Bréchet et al., 2009).

Видовая специфичность и тип биогеоценоза являются важными предикторами почвенного дыхания. Считается, что в хвойных лесах скорость почвенного дыхания примерно на 10 % ниже, чем в широколиственных лесах, в то время как на лугах скорость почвенного дыхания в среднем на 20 % выше, чем в лесных массивах (Raich, Tufekciogul, 2000). В исследовании (Курганова и др, 2021) на примере хроноряда на агродерново-подзолах, выведенных из

сельскохозяйственного использования 11, 16 и 40 лет назад, также подчеркивается значимое изменение гетеротрофного дыхания и микробной биомассы по мере сукцессионного развития сообщества, что обусловлено, в первую очередь, поступлением растительного опада. Максимальные значения базального дыхания характерны для почв 40-летней залежи мелколиственного леса, где легкоразлагаемый опад обеспечивает наличие большого запаса доступного субстрата для микробного сообщества.

Другой важной характеристикой наземных экосистем, влияющей на потоки CO_2 , является биоразнообразие растительных сообществ. В метаанализе (Chen et al., 2019) показано, что высокое биоразнообразие в лесных, луговых и агроценозах способствует увеличению биомассы почвенных микроорганизмов и, как следствие, гетеротрофному дыханию, при этом отношение грамположительных и грамотрицательных бактерий уменьшается. В старовозрастных лесах эффект от биоразнообразия наиболее выражен по сравнению с молодыми лесами.

Косвенное влияние растительности на скорость почвенного дыхания также обусловлено регулированием температурного и гидрологического режима. Формирование лесной растительности способствует уменьшению амплитуды годовых, месячных и суточных колебаний температуры, а также равномерному распределению осадков и снижению испарения (Мелехов, 1980). В исследовании (Курганова, 2010) были выявлены различия в температурном и водном режимах между лесными и луговыми биогеоценозами в подзоне южной тайги: среднегодовая температура воздуха и почвы под лесным пологом на 10 % ниже по сравнению с лугом, а влажность почвы на 36 % больше. Различия также проявлялись в процессах промерзания-оттаивания, пиковых значениях температур и сумме активных температур. Отмечено, что почвенное дыхание в луговых БГЦ в среднем на 23 % превышало показатели лесных. Гидротермический режим, регулируемый растительностью, оказывает существенное влияние на вариабельность эмиссии CO_2 между рассматриваемыми БГЦ. В лесных и луговых экосистемах США температура почвы на глубине 10 см в течение вегетационного периода для лесных экосистем была на 5°C ниже по сравнению с луговыми. Эта

температурная разница является ключевым фактором, объясняющим более низкую эмиссию CO₂ в лесных экосистемах, где интенсивность почвенного дыхания на 38 % ниже, чем на лугах (Smith, Johnson, 2004).

Почвенное дыхание отражает процессы разложения органического вещества почвы и характеризует потери ПОУ, главным образом в подстилке и верхних минеральных горизонтах. По разным оценкам до 90 % углерода, поступающего с растительным опадом, уходит с потоками CO₂ (Замолотчиков, 2011; Решетникова, 2015). С глубиной почвенного профиля снижается скорость эмиссии CO₂. Показано, что для хвойных лесов вклад дыхания с глубины ниже 30 см составляет 13 % от общего почвенного дыхания (Jassal et al., 2005; Goffin et al., 2014), для пашни данный показатель мене 20 % (Wiaux et al., 2015). Этот процесс обусловлен как большими запасами доступного для микроорганизмов углерода в верхних слоях почвы, так и снижением аэрации вниз по почвенному профилю (Kalbitz et al., 2000; Evans et al., 2020). Эмиссия CO₂ из почв отражает скорость биогеохимических циклов углерода в почве и трансформацию углерода по почвенному профилю. Высокая скорость эмиссии характеризует активное разложение органического вещества в горизонте подстилки и его последующий переход в более глубокие горизонты почв, что потенциально ведет к стабилизации ПОУ. Показано, что гетеротрофное дыхание является главным механизмом потерь ПОУ и основным фактором, определяющим среднее время пребывания углерода в почвенном пуле (Кудеяров, 2023). От стадии пашин до формирования 40-летних мелколиственных березняков на постагрогенных землях южной тайги запасы почвенного углерода и микробного дыхания в старопахотном горизонте почвы увеличиваются (Курганова и др., 2022). Однако, при формировании зрелого хвойного леса происходит значительное увеличение запасов углерода в подстилке и снижение микробного дыхания, что обусловлено качеством хвойного опада.

За практически 35-летний период изучения эмиссии CO₂ в России накоплено значительное количество данных. Имеются сведения о потоках CO₂ практически для всех природных зон России (степь, лесостепь, тайга, тундра, лесотундра), а также сравнительные данные для различных типов землепользования (вырубка,

пастбище, агроценозы, залежь) (Кудеяров, 1995; Замолодчиков, 2003; Кудеяров и др., 2007; Курганова, 2010; Осипов, 2023; Гончарова и др., 2023). Оценки динамики почвенного дыхания в процессе зарастания постагрогенных экосистем рассмотрены в работах (Романовская, 2008; Курганова, 2010; Чалая, 2012; Карелин, 2017; Суховеева и др., 2023), в частности для территорий южной тайги (Курганова, 2010; Чалая, 2012). Считается, что процесс формирования лесных биогеоценозов сопровождается тенденцией к снижению почвенного дыхания, однако, данная закономерность не является абсолютной (Курганова, 2010; Чалая, 2012; Суховеева и др., 2023). В старовозрастных лесах эмиссия CO_2 из почв ниже по сравнению с молодняками и средневозрастными лесами (Чалая, 2012). При этом для европейской части России почвенное дыхание в лесных и луговых сообществах значимо не различается (Суховеева и др., 2023). Для южной части европейской России при сравнении участков с лесными насаждениями и участков, покрытых травяной растительностью, эмиссия CO_2 из почвы для первых была в среднем в 1,35 раза выше, чем для вторых (Замолодчиков и др., 2022). Высокая пространственная и временная вариабельность, а также вариативное влияние множества факторов обуславливают высокую неопределенность при количественных оценках почвенного дыхания, что, в свою очередь, подчеркивает необходимость проведения многолетнего мониторинга с учетом комплексного влияния факторов.

Выводы к главе 1

1. При зарастании постагрогенных земель динамика ПОУ характеризуется высокой вариабельностью, которая в значительной степени обусловлена влиянием растительных сообществ. Биометрические показатели, следовательно, и продуктивность древостоев, сформированных на неиспользуемых сельскохозяйственных землях, выше, чем для древостоев на землях лесного фонда. Поэтому вклад растительности в регулирование запаса почвенного углерода на таких землях требует отдельного изучения. Для постагрогенных экосистем южной тайги с дерново-подзолистыми остаточными карбонатными почвами отсутствуют

оценки вариабельности запасов почвенного углерода. Важно отметить, что большая часть исследований оценивает запасы углерода на глубину до 30 см и не учитывает запасы углерода в нижних горизонтах, доля которых может составлять до 33% от общего запаса углерода почв.

2. Влияние растительности на запасы ПОУ заключается в комплексном регулировании таких экосистемных потоков как:

1) поступление углерода с растительным опадом. Качественные и количественные характеристики опада зависят от видовой специфичности растений, продуктивности растительных сообществ и видового разнообразия, и в свою очередь определяют накопление углерода в подстилке. Показано, что процессы разложения подстилки, обусловленные качеством опада, играют важную роль для перераспределения органического вещества почвы. К настоящему времени имеются лишь единичные исследования о формировании и поступлении растительного опада в постагрогенных экосистемах.

2) поступление РОУ с атмосферными выпадениями и его вынос с почвенными водами. Потоки РОУ играют важную роль в углеродном балансе наземных экосистем составляя до 17 % чистой экосистемной продукции. Для лесных экосистем установлено, что видовой состав, возраст, продуктивность и структура древостоев оказывает значимое влияние как на объемы РОУ, так и на их химический состав. Однако, для постагрогенных лесных и луговых экосистем России такие оценки прежде не проводились.

3) эмиссией CO_2 из почвы, которая является основным потоком углерода между почвой и атмосферой. Накоплено значительное количество данных о дыхании почв в постагрогенных экосистемах, в частности для территорий южной тайги. Такие оценки на дерново-подзолистых остаточно-карбонатных почвах прежде не проводились. Высокая временная и пространственная вариабельность почвенного дыхания (до 60 %) обуславливает необходимость проведения многолетних натурных оценок данного потока.

3. Для постагрогенных экосистем не определены показатели экосистемных процессов, определяющие разницу в запасах ПОУ между различными

растительными сообществами, что связано с недостатком знаний о процессах формирования растительного опада и отсутствием данных о поступлении и выносе РОУ.

4. Для постагрогенных луговых и мелколиственных типов БГЦ южной тайги отсутствуют комплексные оценки влияния растительности на варьирование запасов почвенного углерода.

ГЛАВА 2. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

2.1 Район исследования

Район исследования – Череповецкий район Вологодской области относится к северо-западной части Русской равнины подзоны южной тайги (Воробьев, 1999), и приурочен к Московской синеклизе (Савинов, Романова, 1970). Ландшафт холмисто-равнинный. Возвышенности приурочены к краевым зонам оледенения, низменности возникли на месте приледниковых и послеледниковых водоемов после спада их уровня. Первые представлены Андогской грядой и Вологодской возвышенностью, вторые – Молого-Шекснинской низменностью и Средне-Шекснинской низиной (Воробьев, 1999). Высота варьирует от 102 до 270 метров над уровнем моря. Уклон пологий в южном и юго-западном направлениях составляет от 0° до 5° (Воробьев, 1999).

Климат – умеренно-континентальный с умеренно теплым летом и холодной зимой, характеризуется неустойчивым режимом погоды (Воробьев, 1999). Среднегодовая температура воздуха за 30 лет (1995 – 2025 гг) составляет $+3,9^{\circ}\text{C}$; средняя температура зимой – $-8,1^{\circ}\text{C}$, летом – $+16,4^{\circ}\text{C}$. Среднегодовое количество осадков – 645 мм/год. Наибольшее количество осадков выпадает в июле, наименьшее – в апреле (рисунок 2.1). Количество дней со среднесуточной температурой выше 10°C , при которой происходит активная вегетация растений, составляет 110 – 146 дней (с конца апреля по середину сентября). Среднесуточная температура выше $+5^{\circ}\text{C}$ устанавливается 24 апреля, ниже $+5^{\circ}\text{C}$ – 28 октября. За это время накапливается сумма активных температур 2387°C . Безморозный период в Череповецком районе длится в среднем 144 дня, с начала апреля до первой декады ноября (Архив погоды..., 2025; Погода и климат..., 2025). Потоки ветров в районе исследования непостоянны по направлению и скорости (Воробьев, 1999). Преобладают ветра западно-юго-западных, юго-юго-западных и юго-западных румбов со средней скоростью потока 2,8 м/с (Архив погоды..., 2025).

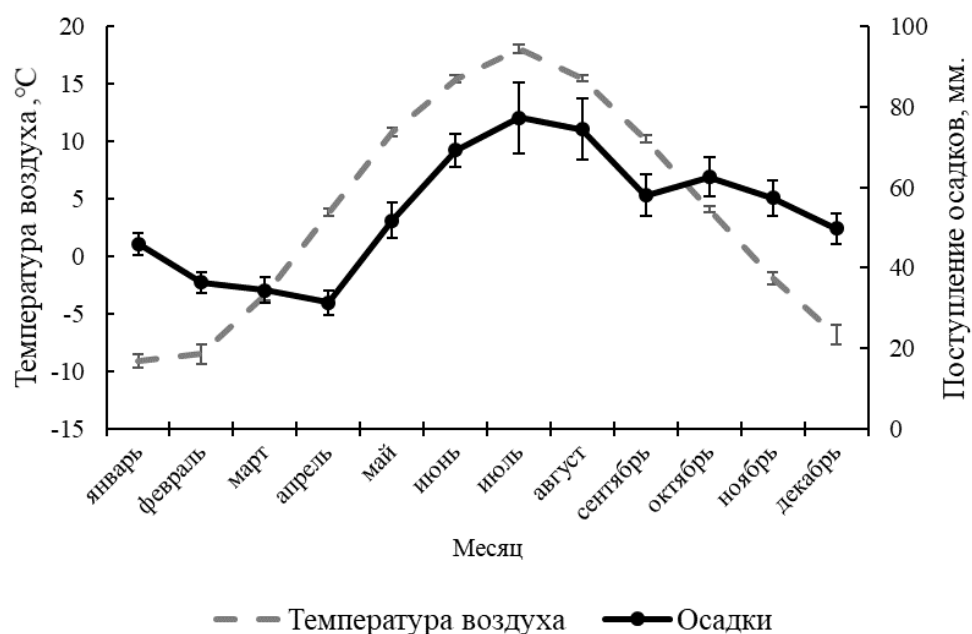


Рисунок 2.1 – Среднемесячная динамика температуры и осадков района исследования за 30-летний период (Погода и климат..., 2025)

Согласно лесорастительному районированию, Череповецкий район относится к Скандинавско-Русской провинции лесной зоны, подзона южной тайги Русской равнины (Курнаев, 1973). Несмотря на то, что коренным типом растительности являются еловые леса (Воробьева и др., 2007), в настоящее время в Череповецком районе преобладают мелколиственные леса. Лесистость составляет менее 50 % (Баженова и др., 2024). Флора Череповецкого района включает 758 видов высших сосудистых растений, относящихся к 359 родам, 100 семействам и 5 отделам. Среди травянистых растений в лесных экосистемах преобладают бореальные и неморальные виды (Сулова и др., 1999).

Согласно национальному атласу почв Российской Федерации (Шоба и др., 2011) на территории Череповецкого района Вологодской области преобладают дерново-подзолистые, преимущественно мелко- и неглубокоподзолистые среднесуглинистые валунные и галечниковые почвы, дерново-подзолистые остаточо-карбонатные среднесуглинистые почвы, торфяные болотные верховые, а также дерново-подзолистые иллювиально-железистые и дерново- и перегнойно-глеевые песчаные почвы. Почвы, сформированные на карбонатной морене, занимают около 20 % района исследования (Шоба и др., 2011).

2.2 Объект исследования

Исследования проводили в БГЦ трёх типов: луг разнотравно-злаковый (координаты: $59^{\circ}13'23''$ N, $37^{\circ}31'29''$ E) (далее **луг**), **березняк злаковый** (координаты: $59^{\circ}12'54''$ N, $37^{\circ}31'47''$ E) и березняк ольхово-ивовый высокотравный (координаты: $59^{\circ}19'42''$ N, $37^{\circ}41'16''$ E) (далее **березняк высокотравный**) (рисунок 2.2, 2.3). БГЦ расположены на бывшей пашне АО «Нелазское» и совхоза «Абакановский» соответственно. По данным Департамента сельского хозяйства и продовольственных ресурсов Вологодской области сельскохозяйственные угодья не используются более 20 и 30 лет соответственно.

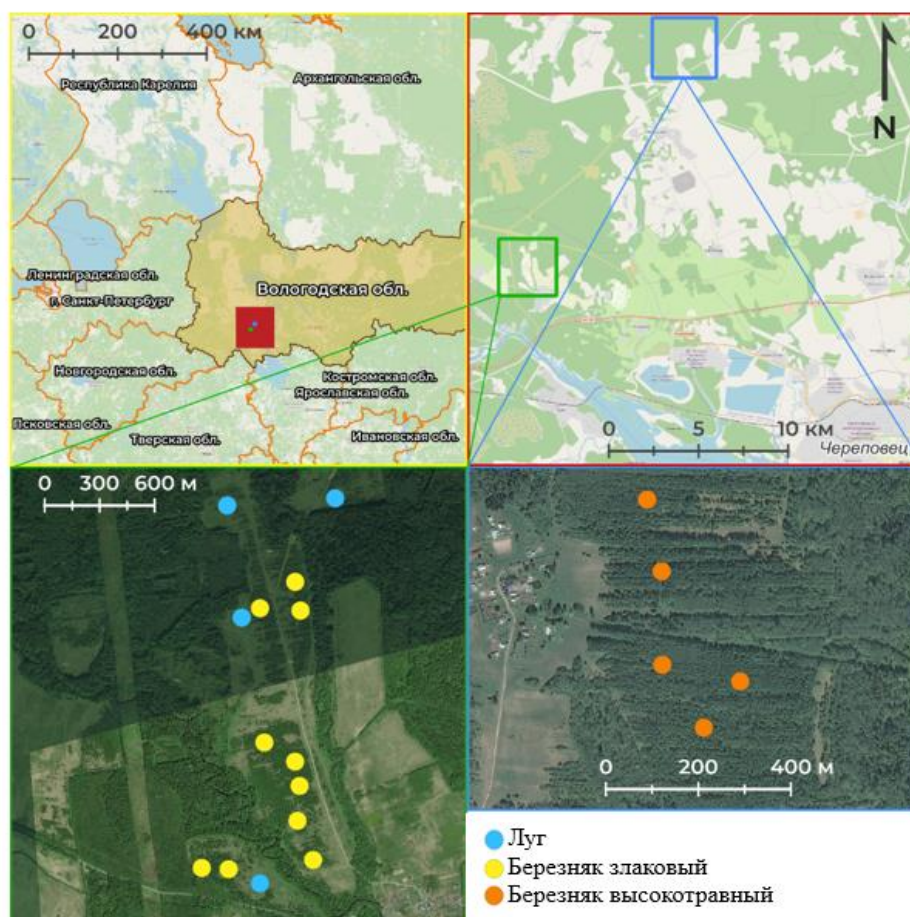


Рисунок 2.2 – Расположение БГЦ



Рисунок 2.3 – Общий вид БГЦ

Возраст древостоя березняка злакового 10 – 15 лет (таблица 2.1). По данным таксации, древесный ярус представлен березой бородавчатой (*Betula pendula* Roth) – 90 % от запаса древостоя и ольхой серой (*Alnus incana* L.) – 10 % от запаса. Единично встречаются ива козья (*Salix caprea* L.), осина (*Populus tremula* L.) и ель обыкновенная (*Picea abies* L.). Средний запас древостоя – 103 м³/га, густота – 1,2 тыс. шт./га и сомкнутость древесного полога – 71 %. Средний диаметр и средняя высота древостоя – 10,6 см и 12,2 м соответственно (Гичан и др., 2025). В подросте преобладает *Betula pendula*, встречаются *Salix caprea* и *Alnus incana*, единичные особи *Populus tremula* и *Picea abies*. В подлеске преобладают клен остролистный (*Acer platanoides* L.) и вяз шершавый (*Ulmus glabra* Huds.). Из кустарников отмечены рябина обыкновенная (*Sorbus aucuparia* L.) и черемуха обыкновенная (*Padus avium* Mill.). В травяном ярусе преобладают злаки: ежа сборная (*Dactylis glomerata* L.), овсяница луговая (*Festuca pratensis* Huds.), полевица тонкая (*Agrostis capillaris* L.), луговик дернистый (*Deschampsia cespitosa* L.) и др. виды.

Таблица 2.1 – Таксационная и геоботаническая характеристика БГЦ

Показатель	Биогеоценоз		
	Луг	Березняк злаковый	Березняк высокотравный
1	2	3	4
Состав древостоя	–	9Б1ОЛС+ИВД ед. ОС, Е	6Б2ИВД2ОЛС ед. ОС, Е

Продолжение таблицы 2.1

1	2	3	4
Средний возраст преобладающей древесной породы, лет.	–	10–15	20–25
Запас, м ³ /га	–	103	186
Средний диаметр преобладающей породы, см	–	10,6	13,8
Средняя высота преобладающей породы, м	–	12,2	15,7
Густота, тыс. шт./га	–	1,7	1,2
Сомкнутость яруса А, %	–	71	62
Видовое богатство яруса А	–	3	4
Состав подроста	–	8Б2ИВ+ОЛС ед. ОС, Е	5ИВ4Б1ОЛС ед. ОС, Е
Подлесок	–	<i>Acer platanoides, Ulmus glabra, Sorbus aucuparia, Padus avium</i>	<i>Viburnum opulus, Frangula alnus, Grossularia reclinata, Lonicera pallasii, Fraxinus excelsior</i>
Сомкнутость яруса В, %	–	22	23
Видовое богатство яруса В	–	4	6
Доминанты напочвенного покрова	<i>Dactylis glomerata, Agrostis capillaris, Festuca pratensis, Elytrigia repens</i> и др.	<i>Dactylis glomerata, Festuca pratensis, Agrostis capillaris, Deschampsia cespitosa</i> и др.	<i>Aconitum septentrionale, Athyrium filix-femina, Filipendula ulmaria, Equisetum sylvaticum, Anthriscus sylvestris</i> и др.
Видовое богатство яруса С	37	38	48
Проективное покрытие яруса С, %	95	85	79

Возраст древостоя березняка высокотравного – 20 – 25 лет, где также, как и в березняке злаковом, преобладает *Betula pendula*, но доля ее участия в составе древостоя меньше на 33 %. При этом участие *Alnus incana* и *Salix caprea* возрастает (таблица 2.1). Запас древостоя березняка высокотравного в 1,8 раз больше по сравнению с березняком злаковым. В березняке злаковом средний диаметр и высота древостоя – 10,6 см и 12,2 м, что на 3,2 см и 3,5 м соответственно меньше чем в березняке высокотравном, густота древостоя характеризуется обратной

закономерностью: для первого БГЦ она в 1,4 раза больше по сравнению со вторым БГЦ. В подросте преобладают *Salix caprea* и *Betula pendula*, также встречается *Alnus incana*, реже *Populus tremula*, *Picea abies*, *Salix aucuparia* и *Padus avium*. Подлесок представлен калиной обыкновенной (*Viburnum opulus* L.), крушиной ломкой (*Frangula alnus* Mill.), крыжовником обыкновенным (*Grossularia reclinata* L.), жимолостью Палласа (*Lonicera pallasii* L.) и др. Встречаются единичные деревья ясеня обыкновенного (*Fraxinus excelsior* L.). Травяной ярус представлен высокотравьем – борцем высоким (*Aconitum septentrionale* Koelle), кочедыжником женским (*Athyrium filix-femina* (L.) Roth), лабазником вязолистным (*Filipendula ulmaria* (L.) Maxim), в т.ч. лесными видами – хвощом лесным (*Equisetum sylvaticum* L.), купырем лесным (*Anthriscus sylvestris* (L.) Hoffm). Некоторые виды при низком обилии встречаются с высоким постоянством – сныть обыкновенная (*Aegopodium podagraria* L.), копытень европейский (*Asarum europaeum* L.) и др.

В травостое луга преобладают злаки: *Dactylis glomerata*, *Agrostis capillaris*, *Festuca pratensis*, пырей ползучий (*Elytrigia repens* (L.) Desv. ex Nevski), кострец безостый (*Bromopsis inermis* (Leyss.) Holub) и др. (таблица 2.1). Отмечены виды лугового разнотравья: лютик едкий (*Ranunculus acris* L.), василек фригийский (*Centaurea phrygia* L.), зверобой продырявленный (*Hypericum perforatum* L.), тысячелистник обыкновенный (*Achillea millefolium* L.), звездчатка злаковая (*Stellaria graminea* L.) и др. Также в травяном покрове отмечены лесные, нитрофильные и водно-болотные виды: *Anthriscus sylvestris*, крапива двудомная (*Urtica dioica* L.), валериана лекарственная (*Valeriana officinalis* L.), вероника длиннолистная (*Veronica longifolia* L.) и др.

Тип почв всех исследуемых БГЦ – дерново-подзолистая постагрогенная остаточно-карбонатная супесчаная на карбонатной морене (Шишов и др., 2004), Albic EnPOUalcaric Retisols (WRB..., 2022). Профиль почв O – AYpa – AYEL – ELf – BELf – BTf,ca – Cca,f. Горизонт подстилки в луговом типе БГЦ представлен луговым очесом, в мелколиственных – подгоризонтом LF, состоящим преимущественно из слабо- и среднеразложившихся растительных остатков мелколиственных пород. Подстилка маломощная, в среднем 1 – 2 см.

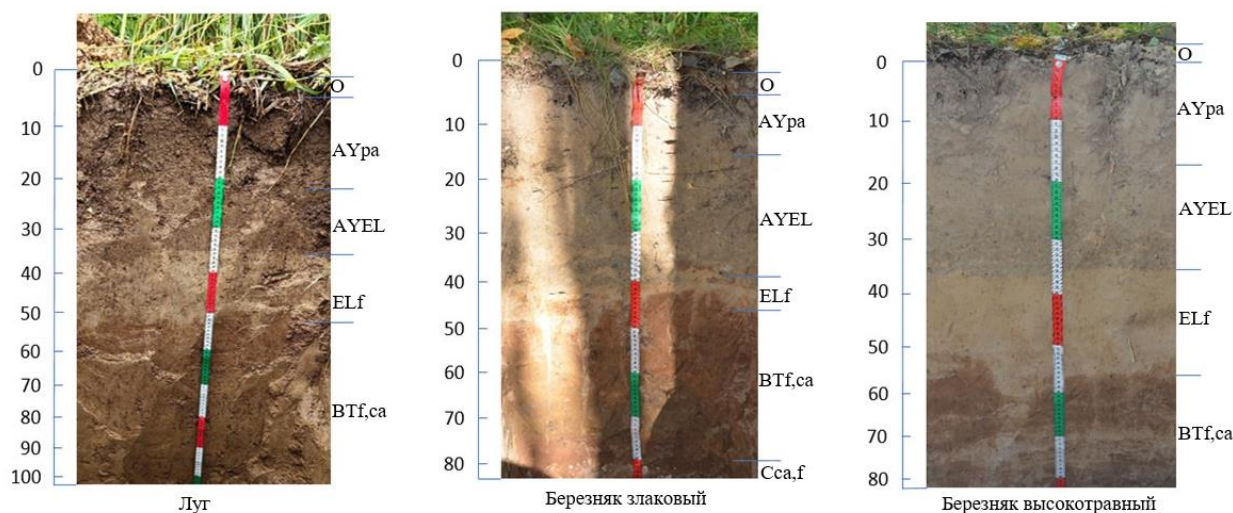


Рисунок 2.4 – Строение почвенных профилей

Серогумосовый горизонт имеет цвет по шкале Манселла 10 YR 5/2, 5/3, уплотнённый, комковато-порошистый, на лугу характеризуется обилием корней. Мощность горизонта AYpa для березняков составляет 14 ± 2 см, что на 6 см меньше по сравнению с лугом. Переходный горизонт AYEL плотный, комковато-порошистый с тенденцией к слоистости, присутствуют Fe-Mn конкреции, цвет по шкале Манселла 10 YR 5/3, 6/3, 6/4 с белёсыми разводами. Мощность горизонта AYEL для луга, березняка злакового и березняка высокотравного составляет 14 ± 2 , 19 ± 1 и 17 ± 1 см соответственно. На глубине 35 ± 3 см наблюдается ровная граница между горизонтами AYEL и ELf, что еще раз подтверждает предыдущее сельскохозяйственное использование. Элювиальный горизонт (ELf) очень плотный, листового сложения, богат Fe-Mn конкрециями, цвет по шкале Манселла 10 YR 6/4, 7/3. Мощность горизонта ELf в березняке злаковом составляет 11 см, что на 6 см меньше по сравнению с березняком высокотравным. Наблюдается затечный переход от горизонта ELf по направлению к горизонту BTf,ca. Текстурный горизонт (BTf,ca) буро-рыжий, цвет по шкале Манселла 10 YR 6/4, 5/4, 6/6, очень плотный, агрегаты имеют призматическое строение с обилием Fe-Mn конкреций. В нижней части горизонта наблюдается обилие карбонатов. По степени влажности почвы горизонт BTf,ca свежий или влажный. Горизонт BTf,ca для всех БГЦ начинается с 46 ± 5 см и в большей части почвенных профилей заканчивается глубже 100 см. Горизонт Cca,f буровато-красный, цвет по шкале Манселла 10 YR

6/4, агрегаты имеют призматическое строение с обилием Fe-Mn конкреций и карбонатов. Материнская порода (Cca,f) представлена карбонатной мореной, начинается в среднем с глубины 110 см. Глубина залегания карбонатов начинается с 64 – 83 см, варьирование углерода карбонатов в горизонте VTf,ca составляет от 0,1 до 3,7 %.

Подробная характеристика физических и химических показателей почв исследуемых БГЦ представлена в Приложении А, таблицы А1 – А3. Почвы БГЦ всех типов характеризуются легким гранулометрическим составом: супесчаные крупнопылевато-пылеватые (Приложение А, таблица А1). Подстилка, а также почвенные слои АУра и АУЕЛ на лугу – слабокислые ($pH_{\text{вод}}$ от 6,1 до 6,3); в нижней части почвенного профиля реакция среды близкая к нейтральной ($pH_{\text{вод}}$ от 6,6 до 6,9). Почвы лесных экосистем имеют слабокислую реакцию среды для всей мощности почвенного профиля, $pH_{\text{вод}}$ находится в диапазоне от 5,5 до 6,2 (Приложение А, таблица А2).

Почвообразующие породы для всех БГЦ имеют принципиально схожее содержание элементов (Приложение А, таблица А3). Валовое содержание элементов в почвообразующей породе имеет следующую последовательность (по убыванию):

для луга –	$Al \rightarrow Fe \rightarrow K \rightarrow Na \rightarrow Ca \rightarrow Mg \rightarrow Mn \rightarrow P$;
для березняка злакового –	$Al \rightarrow Fe \rightarrow K \rightarrow Ca \rightarrow Na \rightarrow Mg \rightarrow Mn \rightarrow P$;
для березняка высокотравного –	$Al \rightarrow Fe \rightarrow K \rightarrow Ca \rightarrow Na \rightarrow Mg \rightarrow Mn \rightarrow P$.

2.3 Методы исследования

Дизайн исследования. В березняке злаковом заложено 10 пробных площадей (ПП), в березняке высокотравном – 5 ПП, на лугу – 4 ПП, каждая площадью 0,96 га. ПП закладывались в виде прямоугольника со сторонами 80 × 120 м. Для учета внутрипространственной вариабельности в пределах каждой ПП организованы 6 учётных площадок размером 20 × 20 м, где проведены таксационные и геоботанические работы, а также отборы почвенных образцов. На каждой ПП определяли запасы углерода фитомассы (с подразделением на древостой, подрост,

подлесок и живой напочвенный покров), мортмассы (с подразделением на сухостой, валеж и пни), подстилки и минеральных горизонтов почвы. Также проводили оценки потоков углерода, включая поступление углерода с атмосферными выпадениями и вынос с почвенными водами с глубины 30 см (2023 – 2025 гг.) и вынос с почвенными водами с глубины 10 см (2025 г.), поступление углерода с растительным опадом (2024 – 2025 гг.), эмиссию CO₂ из почвы (2023 – 2025 гг.). В работе период покоя характеризует сумарный поток углерода за период с ноября по апрель, вегетационный период – за период с мая по октябрь (Приказ Рослесхоза..., 2018).

Оценка запаса углерода фитомассы. К древостою относили деревья диаметром равным или более 6 см. Оценку запаса древостоя проводили путем сплошного подервного перечета по общепринятым методикам таксации лесосек (Загребев и др., 1992; Об утверждении..., 2022). Запас стволовой древесины оценивали по формуле:

$$V_{ст} = GHf, \quad (1)$$

где $V_{ст}$ – запас стволовой древесины, м³; G – площадь сечения на высоте 1,3 м от основания ствола, м²; H – высота ствола, м; f – видовое число.

Учёт подроста и подлеска проводили путем сплошного перечета с измерением диаметров и высот. К подросту относили основные лесообразующие породы диаметром менее 6 см. Пул углерода подземной и надземной древесной фитомассы, подроста и подлеска рассчитывали с использованием соответствующих конверсионных коэффициентов (Приказ Минприроды..., 2022).

Геоботанические описания проводились на каждой ПП в шестикратной повторности с составлением полного флористического списка (Черепанов, 1995; Ignatov et al., 2006). Определение проективного покрытия видов проводили по шкале Ж. Браун-Бланке (Миркин и др., 1989). Определение принадлежности вида к эколого-фитоценотическим группам – с помощью базы данных (Заугольнова, Морозова, 2006). Названия типов леса составлены с использованием классификации типов леса Европейской России (Ценофонд..., 2024). Укосы напочвенного покрова проводили в пределах каждой ПП в трёхкратной

повторности, в период максимального накопления фитомассы (август). Образцы надземной фитомассы (укосы) отбирали с использованием рамки 50×50 см, с выделением пяти доминирующих видов растений. Отборы подземной фитомассы проводили в том же месте и повторностях, что и для надземной фитомассы, рамкой 25×25 см в березняках на глубину 15 см, и рамкой 10×10 см на лугу, на глубину 0 – 15 и 15 – 30 см., что обусловлено глубиной корнеобитаемого слоя (Базилевич и др., 1978, Ритм углерода..., 2025).

Оценка запаса углерода мортмассы. Оценку запасов углерода в сухостое проводили на основании данных сплошного подеревного перечёта древостоя по описанной выше методике. Для оценки запаса углерода в валеже и пнях на каждой ПП закладывали площадку размером $17,4 \times 17,4$ м. Таким образом, площадь обследования (300 м^2) соответствовала общепринятым методикам (Приказ Минприроды..., 2022; Ритм углерода..., 2025). Учитывали валеж и пни диаметром более 3 см. При перечёте учитывали диаметр, длину валежа и стадию разложения древесины, которую определяли по морфологическим признакам в соответствии с работами (Шорохова, Шорохов, 1999; Shorohova, Kapitsa, 2015). Абсолютно сухую массу стволов и пней вычисляли по объёму и базисной плотности древесины, в соответствии с коэффициентами, предложенными в работах (Бобкова и др., 2015; Шорохова, 2020). Для пересчёта абсолютно сухой массы на углерод использовали коэффициент 0,5.

Оценка запасов углерода подстилки и минеральных слоев почв. Оценку запаса углерода в подстилке проводили на каждой ПП в шестикратной повторности с использованием рамки 25×25 см. Для оценки пула углерода в минеральных горизонтах почвы на каждой пробной площади отбирали образцы из опорного почвенного разреза глубиной до 100 см. и проводили пятикратный отбор образцов из минеральных горизонтов с использованием почвенного бура (бур Некрасова). Отбор образцов осуществляли по генетическим горизонтам: О, АУра, АУЕЛ, ЕLf, ВТf,са. Запасы углерода пересчитывали на слои 0 – 5, 5 – 15, 15 – 30, 30 – 50, и 50 – 100 см для сравнения между БГЦ. Материнская порода начинается со 110 см, поэтому не учитывается при расчете запасов углерода в метровом слое почвы.

Плотность сложения определяли по горизонтам объемно-весовым методом с использованием кольца пробоотборника ПГ-100. К мелкозему относили фракцию менее 2 мм, которую определяли путем просеивания через сито соответствующего размера (Cools, De Vos, 2025). Расчет запаса ПОУ проводили по стандартной формуле (Приказ Минприроды..., 2022) с учетом доли мелкозёма и $C_{\text{карб.}}$, по формуле:

$$\text{ПОУ} = (C - C_{\text{карб.}}) \times H \times \text{BD} \times F / 100, \quad (2)$$

где ПОУ – запас углерода почвенного органического вещества, т/га; BD – плотность, г/см³; C – концентрация углерода, %; $C_{\text{карб.}}$ – концентрация углерода карбонатов, %; H – мощность, см; F – доля мелкозема в соответствующем объеме почвы, %.

Оценка поступления и миграции РОУ. Для оценки поступления растворенного органического углерода с атмосферными выпадениями и его миграцией с почвенными водами были установлены гравитационные лизиметры, конструкции Джона Дерома (Clarke et al., 2022) и осадкоприемники. Гравитационные лизиметры и осадкоприемники установлены однократно на каждой пробной площади в каждом типе БГЦ (10 шт. в березняке злаковом, 5 шт. – в березняке высокотравном, 4 шт. – на лугу), для лесных экосистем – в подкروновых элементах мозаики. Отборы образцов атмосферных выпадений и лизиметрических вод в период с мая по ноябрь проводились ежемесячно (Кузнецова, 2021; Ершов, 2021). В период с декабря по апрель проводили однократный отбор образцов снега в период максимального снегонакопления.

Почвенные лизиметры заложены на глубину 10 и 30 см в горизонте АУра и под горизонтом АУЕЛ соответственно. Площадь сбора воронки осадкоприемника составляет 0,02 м², емкость для сбора атмосферных выпадений – полиэтиленовый пакет вместимостью 3 л. Площадь сбора воронки лизиметра – 0,028 м², емкость для почвенных вод – пластиковая бутылка объемом 2,5 л. Для отсеивания почвенных частиц воронку наполняли гранулами полиэтилена низкого давления и накрывали органзой. Отборы почвенных вод проводили вакуумным насосом. Все емкости для

сбора и транспортировки проб, а также гранулы предварительно обрабатывались дистиллированной водой.

Отборы снегового керна проводили из ненарушенной стенки профиля снежного покрова при помощи пластиковой трубы и пластины ограничителя, которая предотвращает выпадение снегового керна снизу из трубы. Площадь сбора снега – 0,01 м².

Потоки (поступление с атмосферными выпадениями и миграция с почвенными водами) определяли, как произведение концентрации элементов и соответствующих объемов с известной площади за определенный период времени. В работе принято, что положительная разница между поступлением РОУ с атмосферными выпадениями и выносом с почвенными водами в нижние почвенные горизонты представляет собой аккумуляцию, отрицательная – вымывание. Вынос РОУ в нижние почвенные слои оценивали с глубины 10 и 30 см минеральной толщи почвы.

Оценка поступления углерода с растительным опадом. Для оценки поступления углерода с древесным опадом использовали опадоуловители, которые устанавливали на каждой ПП лесных БГЦ в репрезентативных участках подкрановых пространств. В качестве конструкции для опадоуловителя использовался деревянный каркас высотой 1,5 м, к которому крепился нейлоновый мешок таким образом, чтобы мешок был на высоте 0,5 м от поверхности почвы. Площадь сбора опадоуловителя – 0,9 м² (Иванова, 2021). Отбор образцов опада проводился ежемесячно с мая по ноябрь и однократно в период с декабря по апрель, в апреле. В лабораторных условиях опад сортировали на фракции: 1) ивовые и ольховые фракции: листья и ветки 2) березовые: листья, ветки, почки, кроющие чешуйки, сережки, семена, кора. Фракции взвешивали и пересчитывали на абсолютно сухую массу. Исследуемые фракции сгруппированы на активную и неактивную группы в зависимости от отношения C/N (Карпачевский и др., 1980). К первой относятся листья березы, ольхи, осины, ивы, сережки, семена, почки. Ко второй – ветки березы, ивы, осины, кроющие чешуйки, кора. Отношение C/N в них ниже и выше 50 соответственно. Оценки поступления углерода с опадом

напочвенного покрова рассчитывали на основании данных укусов, так как в БГЦ всех типов напочвенный покров образован преимущественно однолетними растениями, а укусы проводили в период максимального накопления фитомассы.

Оценки эмиссии CO₂ из почв. Термины «дыхание почвы» и «эмиссия CO₂ из почвы» зачастую отождествляются (Schlesinger, Andrews, 2000; Курганова, 2010), обозначая всю совокупность процессов деструкции органических веществ в почве, что в конечном итоге приводит к выделению углекислого газа, воды и энергии, запасенной в органических соединениях (Кудеяров, 1994, 1999). Несмотря на некоторые смысловые различия между этими терминами (Кудеяров, 1999), их практическое разграничение является весьма затруднительным (Schlesinger, Andrews, 2000; Курганова, 2010). В рамках данной работы они будут использованы как синонимы, характеризуя суммарное выделение углекислого газа из почвы. Оценки эмиссии CO₂ из почв проводили с мая 2023 г. по ноябрь 2025 г. 2 раза в месяц методом закрытых камер-накопителей с использованием модифицированных инфракрасных газоанализаторов AZ (Лопес де Гереню и др, 2005). На каждой ПП было установлено по 6 камер для учета пространственной вариабельности. Из камер удаляли надземные зеленые части растений. Время экспозиции – 5 минут с оценкой концентрации C-CO₂ ежеминутно. Таким образом, определяемый методом закрытых камер поток CO₂ из почв представляет собой суммарное микробное и корневое дыхание почвы. Скорость (интенсивность) дыхания почв вычисляли по формуле (Panikov, Gorbenko, 1992; Kurganova et al., 2003):

$$C-CO_2 = (a \times 60 \times V \times 12 \times 10^4) / (S \times 22.4 \times 10^6), \quad (3)$$

где C-CO₂ поток эмиссии CO₂, мг C/(м² час); а – разница между двумя точками измерения концентрации CO₂ в камере, ppm/мин; V – объём камеры, мл; S – площадь основания камеры, см².

Оценку месячных и сезонных величин эмиссии CO₂ проводили с помощью метода трапеций, по формуле (Karelin, Sukhoveeva, 2021):

$$SR_{tot} = \sum_{i=0}^{n-1} \frac{SR(x_i) + SR(x_{i+1})}{2} (x_{i+1} - x_i), \quad (4)$$

где SR_{tot} – суммарная эмиссия за период наблюдений ($0 - n$), $SR(x_i)$ – среднесуточная скорость эмиссии в первую дату наблюдений x_i , $SR(x_{i+1})$ – среднесуточная скорость эмиссии в следующую дату наблюдений x_{i+1} , $i = 0 \dots n$ – даты наблюдений.

Одновременно с измерением потоков CO_2 измерялись объемная влажность почвы $W_{об}$ (%) влагомером HH2 Moisture Meter фирмы Delta-T с датчиком ML2, температура воздуха на высоте 1 м и почвы на глубине 5 см электронным термометром HI98509 Checktemp 1.

Для оценки связи эмиссии CO_2 с показателями влажности почвы и температуры, исходные данные по почвенному дыханию логарифмировали, что обусловлено экспоненциальным характером связи для исследуемых переменных, а также приближению ряда данных к нормальному распределению.

Температурный коэффициент Q_{10} , характеризующий рост величины почвенного дыхания при повышении температуры на $10^\circ C$, рассчитывали по формулам (Davidson et al., 2006):

$$\ln SR = \alpha X + \beta, \quad (5)$$

где $\ln SR$ – логарифмированные данные по дыханию почвы, α и β – коэффициенты уравнения, X – температура почвы на глубине 5 см) или температура воздуха.

$$Q_{10} = e^{\alpha \times 10}, \quad (6)$$

где Q_{10} – температурный коэффициент, e – значение экспоненты, α – коэффициент уравнения (5).

Химический и физический анализ образцов. Химические анализы проводили в экоаналитической лаборатории Института биологии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук. Концентрация углерода и азота в растительных и почвенных образцах определяли методом газовой хроматографии на элементном анализаторе EA-1110 (CHNS-O) ("CE Instruments", Италия), в соответствии с методикой измерений № 88-17641-004-2016 (ФР,1,31,2016,23502), определение водородного показателя (рН) водной вытяжки проводили по методике № 88-17641-004-2018 (ФР,1,31,2018,31639), гранулометрический состав почв

определялся пипеточным методом по ГОСТ 12536-2014, содержание Ca, K, Mg, Na, Fe в образцах почвы определяли при обработке образцов 1М $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ (Halonen, 1983; Methods..., 1989). Валовое содержание металлов в почве определили атомно-эмиссионным и атомно-абсорбционным методом (атомно-абсорбционные спектрофотометры AA-6800 и AA-7000 (Shimadzu, Япония)). Концентрация углерода карбонатов ($C_{\text{карб.}}$) определяли манометрическим методом с использованием кальциметра (Cools, De Vos, 2025). В образцах атмосферных выпадений и почвенных вод концентрации общего растворенного углерода и растворенного углерода в составе неорганических соединений определяли методом термокаталитического окисления с бездисперсионной ИК-регистрацией с помощью анализатора TOC-VCPN (Shimadzu, Япония). Концентрацию РОУ определяли, как разницу между данными показателями.

Статистический анализ. Статистический анализ данных проводили с использованием программной среды R (4,3,2) (R Core Team, 2024). Для проверки значимости различий среднего использован тест ANOVA ($p \leq 0,05$) и непараметрический тест Краскела-Уоллиса с попарным сравнением по тесту Данна. Для проведения корреляционного анализа использовался коэффициент корреляции Пирсона, при невозможности соблюдения требований к нормальности распределения данных проводили приближение данных к нормальному распределению путем логарифмирования.

Выявление информативных индикаторов и анализ их вклада в вариацию запасов РОУ. Влияние растительности на запасы углерода почв заключается в регулировании процессов, с которыми углерод, с одной стороны, поступает в почву, с другой стороны – выносится из нее (см. раздел 1.2.1-1.2.3). В работе дана оценка влияния растительности через процессы поступления углерода на основе двух групп критериев: 1) качественные и количественные характеристики опада; 2) характеристики поступления РОУ с атмосферными выпадениями. Влияние растительности через процессы выноса углерода оценивалась на основании следующих групп критериев: 1) потоки углерода с почвенным дыханием; 2) характеристики выноса РОУ с лизиметрическими водами в иллювиальный

горизонт. Важно отметить, что данные критерии обуславливают не только процессы поступления/выноса углерода в экосистеме, но и процессы миграции углерода в почвенном профиле. Для каждого критерия определены показатели, характеризующие выполнение экосистемного процесса. В данной работе под показателем подразумевается количественная переменная, отражающая влияние определенного механизма на запасы углерода подстилки и различных слоев минеральных горизонтов почв. Информативность показателя оценивали по следующим критериям: 1) средняя или сильная корреляция ($r > |0,3|$) с запасами ПОУ; 2) наличие причинно-следственного характера связей; 3) статистическая значимость связи между показателем и зависимой переменной – запасом ПОУ ($p < 0,05$, F-тест). Для определения информативных показателей было проанализировано 63 переменных (таблица 2.2), на предмет их связи с различиями между запасами ПОУ в луговых и мелколиственных БГЦ.

Таблица 2.2 – Анализируемые критерии и показатели влияния потоков углерода, определяющих различия между запасами ПОУ.

№пп	Критерий	Показатель
1	2	3
Поступление углерода в подстилку и минеральные горизонты почв		
1	Поступление углерода с растительным опадом и его качественные характеристики	Проанализировано 4 показателя, характеризующих: - отношение C/N в растительном опаде (сумма древесно-кустарникового опада и опада напочвенного покрова) и отдельно в опаде напочвенного покрова, - концентрация N в растительном опаде и отдельно в опаде напочвенного покрова
		Проанализировано 2 показателя, характеризующих: - поступление углерода с растительным опадом и опадом напочвенного покрова
2	Поступление РОУ с атмосферными выпадениями	Проанализировано 36 показателей, характеризующих: - поступление РОУ за год, вегетационный период, период покоя и ежемесячно для вегетационного периода, - концентрации РОУ в атмосферных выпадениях за год, вегетационный период, период покоя и ежемесячно для вегетационного периода, - объемы поступления атмосферных выпадений за год, вегетационный период, период покоя и ежемесячно для вегетационного периода.

Продолжение таблицы 2.2

1	2	3
Вынос углерода из почв		
3	Эмиссия CO ₂	Проанализировано 9 показателей, характеризующих: - почвенное дыхание за вегетационный период в целом и по месяцам вегетационного периода.
4	Вынос РОУ с лизимитрическими водами с глубины 30 см	Проанализировано 36 показателей, характеризующих: - вынос РОУ за год, вегетационный период, период покоя и ежемесячно для вегетационного периода, - концентрации РОУ в лизимитрических водах за год, вегетационный период, период покоя и ежемесячно для вегетационного периода. - объемы лизиметрических вод за год, вегетационный период, период покоя и ежемесячно для вегетационного периода.

Оценку вклада информативных показателей в вариацию запасов углерода в подстилке и минеральной толще почв проводили с использованием метода иерархического разложения (Chevan and Sutherland, 1991). В случае коллинеарности нескольких информативных показателей в иерархическом разложении учитывали один из них с наибольшим вкладом в вариацию запасов РОУ. Анализ выполнен с помощью пакета hier.part (Walsh et al., 2004).

ГЛАВА 3. СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ПУЛОВ УГЛЕРОДА

3.1 Экосистемные запасы углерода

Экосистемные запасы углерода в исследуемых БГЦ находится в диапазоне от 94 до 182 т/га и увеличиваются в ряду луг < березняк злаковый < березняк высокотравный (таблица 3.1) (приложение Б, рисунок Б1). В мелколиственных БГЦ данный показатель в 1,7 раз выше по сравнению с лугом. Также выявлены различия между мелколиственными типами БГЦ: в березняке высокотравном запасы углерода на 26 % больше, чем в березняке злаковом (Gichan et al., 2026).

Таблица 3.1 – Запасы углерода в основных пулах (т/га, в числителе) и доля от общего запаса углерода в биогеоценозе (% , в знаменателе).

Тип БГЦ	Пул углерода					
	фитомасса		подстилка	минеральные слои почвы (0-100см)	мортмасса	всего
	надземная	подземная				
Луг	$\frac{1,8 \pm 0,1}{1,9}$	$\frac{3,9 \pm 1,1}{4,2}$	$\frac{2,1 \pm 0,07}{2,2}$	$\frac{85,8 \pm 7,3}{91,7}$	-	$\frac{93,6 \pm 13,4}{100}$
Березняк злаковый	$\frac{38,3 \pm 5,6}{28,5}$	$\frac{13,0 \pm 1,5}{9,7}$	$\frac{3,6 \pm 0,06}{2,7}$	$\frac{86,4 \pm 4,2}{58,2}$	$\frac{1,3 \pm 0,2}{1,0}$	$\frac{134,4 \pm 10,1}{100}$
Березняк высокотравный	$\frac{70,6 \pm 4,1}{38,8}$	$\frac{17,1 \pm 1,0}{9,4}$	$\frac{2,3 \pm 0,05}{1,3}$	$\frac{95,9 \pm 8,5}{49,2}$	$\frac{2,5 \pm 0,6}{1,4}$	$\frac{182,0 \pm 10,4}{100}$

Примечание: \pm – стандартная ошибка среднего. Подземная фитомасса напочвенного покрова приведена для мощности 0 – 15 см. Серая заливка ячеек – различия значимы при $p \leq 0,05$ при сравнении между каждым из исследуемых БГЦ

Различия между запасами углерода на лугу и в мелколиственных БГЦ обусловлены вкладом пула фитомассы, доля которого для лесных БГЦ составляет 43,2 % (51,3 – 87,7 т /га), в то время как для луга – 6,1% (5,7 т/га) от запаса углерода экосистемы (таблица 3.1). Пул мортмассы в лесных БГЦ незначителен и составляет примерно 1 %. Для всех БГЦ доля пула подстилки не превышает 3 %. Минеральные слои почвы являются основным резервуаром углерода, 49,2 – 91,7 %. На лугу 93,9 % углерода находится в пуле почвы, в лесных БГЦ – 50,6 – 60,9 %.

3.2 Запас углерода фитомассы

Пул фитомассы в мелколиственных БГЦ включает: древостой, подрост, подлесок и напочвенный покров, а на лугу представлен исключительно живым напочвенным покровом. Запас углерода фитомассы на лугу в 12 раз меньше ($p < 0,05$) по сравнению с лесными БГЦ, что объясняется отсутствием древесно-кустарниковой растительности. Между лесными БГЦ также выявлены статистически значимые различия: для березняка высокотравного запасы углерода фитомассы в 1,7 раз больше, чем в березняке злаковом. Различия обусловлены возрастом и таксационными характеристиками древостоев. Отношение суммарной надземной фитомассы к подземной для лесных экосистем находится в диапазоне 2,9 – 4,1, на лугу – 0,46, что связано с развитием плотной дернины.

Запасы углерода в фитомассе древостоя березняка злакового в 2,5 раза меньше по сравнению с березняком высокотравным ($p < 0,05$). При этом для надземной части они различаются в 2,6 раза, для подземной в 1,9 раз (рисунок 3.1а).

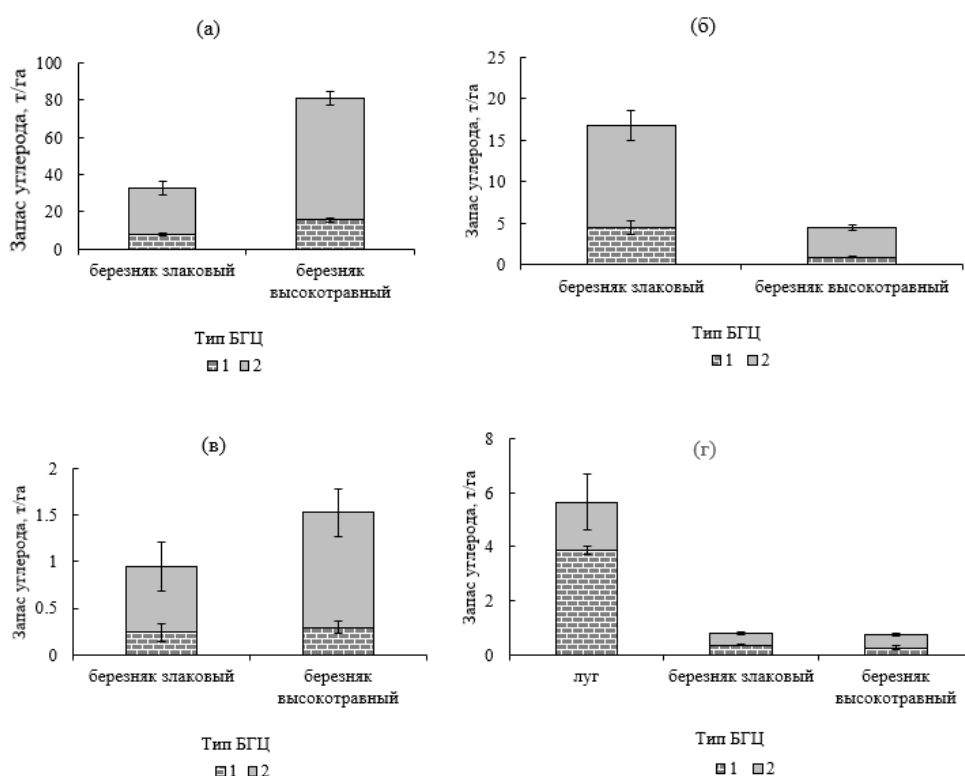


Рисунок 3.1 – Запасы углерода в подземной фитомассе на глубине 0 – 15 см (1) и надземной (2) фитомассе в пулах: а – древостой, б – подрост, в – подлесок, г – напочвенный покров.

Планки погрешности показывают стандартную ошибку среднего.

В березняке злаковом пул фитомассы подроста в 2,5 раза больше ($p < 0,05$) по сравнению с березняком высокотравным (рисунок 3.1б). При этом в березняке злаковом 26 % от общего запаса фитомассы деревьев приходится на тонкомерные деревья с диаметром от 6 до 8 см, тогда как в березняке высокотравном их доля составляет всего 6 %. Значения для подлеска мелкоиственных БГЦ не различаются и в среднем составляют для надземной фитомассы 0,97 т/га, для подземной – 0,27 т/га (рисунок 3.1в).

Смена типа растительного сообщества с лугового на мелколиственное приводит к снижению запасов углерода в напочвенном покрове на 73 %. Пул надземной фитомассы напочвенного покрова на лугу в 3,8 раз больше, чем в лесных БГЦ, подземной (в слое до 15 см) – в 12,5 раз (рисунок 3.1г). В луговом БГЦ преобладают злаки и разнотравье (таблица 2.1). Из-за этого БГЦ формируют сомкнутую дернину, что обуславливает различия в запасах подземной фитомассы. Между мелколиственными БГЦ значимые различия не выявлены как для надземной (в среднем 0,47 т/га), так и для подземной (0,31 т/га) фитомассы напочвенного покрова. Для луга запасы подземной фитомассы в слое 15 – 30 см составляют 0,37 т/га, что в 10 раз меньше по сравнению со слоем 0 – 15 см.

3.3 Запас углерода мортмассы

Размер пулов углерода мортмассы для березняка злакового и высокотравного составляют 1,3 и 2,5 т/га соответственно, при этом 72 % приходится на долю валежа. Значимых различий между БГЦ не выявлено, но для каждого из компонентов мортмассы (сухостой, валеж и пни) наблюдается тренд, показывающий большее накопление углерода в березняке высокотравном. Запасы углерода в сухостое и валеже березняка высокотравного в 2 раза выше, по сравнению с березняками злаковыми и составляют 0,5 и 1,8 т/га соответственно. В пнях для березняка злакового и высокотравного запасы углерода составляют 0,11 и 0,14 т/га соответственно. Выявлена высокая пространственная вариабельность для валежа: коэффициент вариации составляет 42 % в березняке злаковом и 62 % в березняке высокотравном.

3.4 Запас углерода почв

Запасы почвенного углерода (с учетом горизонта подстилки), не различаются между БГЦ и в среднем составляют 92,0 т С/га, при этом 26 % – 35% от общего ПОУ сосредоточены в слое 30 – 100 см. В подстилке запасы углерода увеличиваются в ряду луг < березняк высокотравный < березняк злаковый (рисунок 3.2). Установлено, что на лугу запасы углерода подстилки на 30 % меньше по сравнению с мелколиственными типами БГЦ. Данные различия обусловлены поступлением неактивных фракций опада в лесных БГЦ, характеризующихся долгим оборотом в биогеохимическом цикле. Несмотря на то, что наибольшее поступление опада отмечено на лугу (3,75 т/(га год)), для данного БГЦ весь опад представлен злаковой растительностью, в то время как в мелколиственных БГЦ доля древесно-кустарникового опада составляет 60 % от общего поступления, из которых от 10 % до 25 % приходится на трудноразлагаемые фракции опада (см. главу 4). Запас углерода подстилки для березняка злакового в 1,5 раза выше по сравнению с березняком высокотравным, первый характеризуется большим поступлением опада неактивных фракций по сравнению со вторым (см. главу 4) (Gichan et al., 2026).

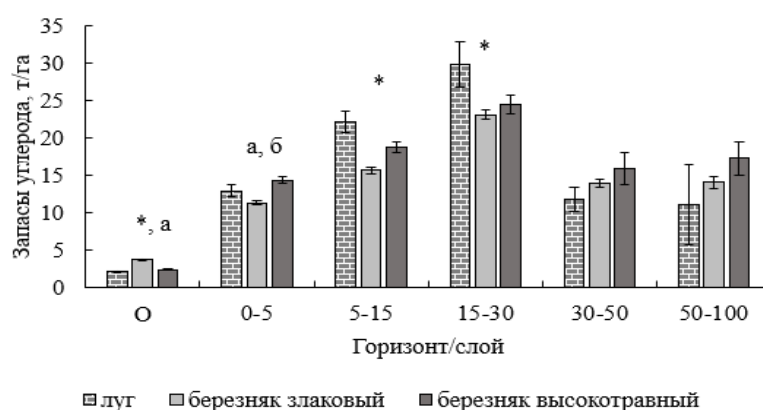


Рисунок 3.2 – Запасы почвенного углерода.

$p < 0,05$ при сравнении между: * – лугом и мелколиственными БГЦ; а – мелколиственными БГЦ; б – лугом и березняком злаковым. Планки погрешности показывают стандартную ошибку среднего.

Для старопахотной толщи (0 – 30 см) запасы углерода на лугу составляют 65 т/га, что на 12 % – 23 % больше по сравнению с лесными БГЦ (рисунок 3.2). В частности, в слое 0 – 5 см березняка злакового запасы ПОУ в 1,2 раза меньше по

сравнению с остальными типами БГЦ, что связано с низкой концентрацией углерода (приложение А, таблица А2). На лугу данный слой характеризуется низкой плотностью и более высокой концентрацией углерода по сравнению с березняком высокотравным, что обуславливает отсутствие различий в ПОУ между данными БГЦ. Запасы углерода в слое 5 – 30 см на лугу в среднем на 23 % больше, чем в мелколиственных БГЦ (рисунок 3.2). Данный слой на лугу характеризуется большей концентрацией углерода по сравнению с мелколиственными БГЦ (приложение А, таблица А2). В слое 30 – 100 см запасы почвенного углерода не различаются между исследуемыми БГЦ и находятся в пределах 22,7 – 33,1 т/га.

Отношение C/N в подстилке мелколиственных БГЦ в среднем составляет 38,5, что на 23 % выше по сравнению с лугом (рисунок 3.3). В лесных БГЦ формируется опад более низкого качества (см. главу 4), что обуславливает его медленное разложение и, как следствие, накопление углерода в подстилке лесных БГЦ. Более узкое отношение C/N в подстилке березняка злакового по сравнению с березняком высокотравным (в 1,2 раз) продиктовано вкладом злаков в напочвенном покрове и меньшим вкладом ивы в запасы древостоя (в 4 раза). В минеральной толще почвы достоверные различия в отношении C/N выявлены только в слое 0 – 15 см – на лугу в 1,2 раза уже по сравнению с лесными БГЦ.

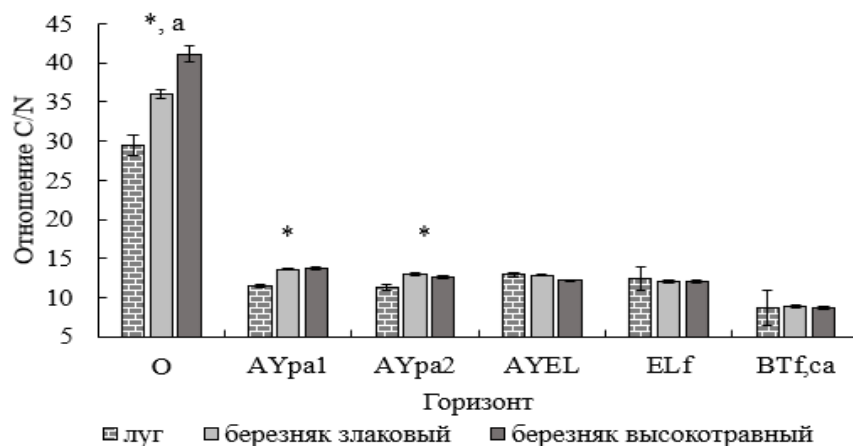


Рисунок 3.3 – Отношение C/N.

$p < 0,05$ при сравнении между * – лугом и мелколиственными БГЦ; a – $p < 0,05$ при сравнении между мелколиственными БГЦ. Планки погрешности показывают стандартную ошибку среднего.

Выводы к главе 3

1. Экосистемные запасы углерода в березняках в 1,7 раз выше по сравнению с лугом. Основными пулами углерода в березняках являются почва и фитомасса, доля которых составляет 44 % и 55 % соответственно. На лугу 94 % углерода находится в пуле почвы. Изменения типа растительного сообщества с лугового на мелколиственные сопровождаются 12-кратным увеличением запасов углерода фитомассы, при этом

2. Показано, что тип растительного сообщества в постагрогенных экосистемах обуславливает различия в запасах углерода подстилки и старопахотной толщи (0 – 30 см) дерново-подзолистых остаточно-карбонатных почв. Запасы углерода подстилки в луговом БГЦ на 30 % меньше, чем в лесных БГЦ. В минеральном слое почв до 30 см запасы углерода в луговом БГЦ на 12 – 23 % больше, чем в лесных БГЦ: для слоя 0 – 5 см запасы ПОУ в луговом БГЦ на 12 % больше, чем в березняке злаковом, в почвенном слое 5 – 30 см в луговом БГЦ запасы в среднем на 23 % больше, чем в мелколиственных БГЦ.

Запасы почвенного углерода в минеральных слоях ниже 30 см не различаются между исследуемыми постагрогенными типами БГЦ. Так как запасы ПОУ в слое 30 – 100 см составляют значительную долю (до 35 %) от запаса ПОУ метровой толщи почвы, запасы углерода в ней также не различаются между БГЦ.

3. Запас углерода подстилки для березняка злакового в 1,5 раза выше по сравнению с березняком высокотравным, в слое 0 – 5 см наблюдается обратная закономерность.

4. Смена типа биогеоценоза с лугового на мелколиственные приводит к снижению запасов углерода напочвенного покрова на 73 %. Пул углерода надземной фитомассы напочвенного покрова на лугу в 3,8 раз больше, чем в лесных БГЦ, подземной (в слое до 15 см) – в 12,5 раз.

ГЛАВА 4. ПОСТУПЛЕНИЕ УГЛЕРОДА С РАСТИТЕЛЬНОМ ОПАДОМ

4.1 Концентрация углерода, азота и отношение C/N растительного опада

Концентрация углерода в активных и неактивных фракциях древесного опада не различается, составляя в среднем 43,5 % (таблица 4.1). Концентрация азота в активных фракциях достигает 1,5 %, что в 2,2 раза превышает данный показатель для неактивных фракций. Отношение C/N опада древесно-кустарниковой растительности существенно варьирует и в большей степени определяется концентрацией азота. Оно становится шире в ряду почки < семена < листья ольхи < листья осины < листья ивы < тычиночные сережки < листья березы < ветки ивы < кроющие чешуйки < ветки осины < кора березы < ветки березы. Таким образом, ветки березы характеризуются наиболее широким отношением C/N – 71,4, а почки и семена березы – наиболее узким – 25,5 и 26,9 соответственно. Коэффициент вариации (CV) для концентрации углерода во фракциях древесно-кустарникового опада составляет 11,3 %, для азота – 55,4 % (Гичан и др., 2026).

Таблица 4.1 – Концентрации C, N и отношение C/N во фракциях опада.

Фракции / эколого-ценотические группы		C, %	N, %	C/N
1		2	3	4
Древесно-кустарниковый опад				
Неактивные фракции	Ветки березы	46,2±1.1	0,6±0.1	71,4±6,9
	Ветки ивы	40,3±3,0	0,8±0,1	71,4±6,9
	Ветки осины	36,3±4,2	0,5±0,1	70,0±3,1
	Кора	51,0±7,9	0,8±0,2	67,1±7,4
	Прицветные чешуйки	39,7±3,2	0,7±0,1	59,5±4,5
Активные фракции	Листья березы	43,9±2,0	1,0±0	45,8±1,0
	Листья ивы	40,5±2,0	1,2±0,1	32,7±1,7
	Листья ольхи	39,9±2,7	1,4±0,4	29,3±3,8
	Листья осины	40,8±7,1	1,1±0,1	37,3±1,1
	Почки	52,1±5,3	2,0±0,1	25,5±0,1
	Семена	42,6±2,3	1,6±0,2	26,9±1,2
	Тычиночные сережки	43,8±3,2	1,1±0,5	38,7±7,7

Продолжение таблицы 4.1

1	2	3	4	5
Напочвенный покров				
Активные фракции	Бореальная	41,4±0,9	1,6±0,1	25,6±3,0
	Высокотравная	45,9±0,6	1,4±0,1	32,1±1,8
	Луговая и лугово-опушечная	45,4±0,3	1,5±0,1	30,1±0,8
	Неморальная	44,7±0,8	1,7±0,1	26,3±2,1
	Нитрофильная	46,5±0,4	1,7±0,1	28,2±2,1
	Боровая (бореальная)	46,5±0,3	1,5±0,2	30,4±2,6

Примечание: ± – стандартная ошибка среднего. Для каждой фракции / эколого-ценотической группы n = 30.

Концентрация углерода в опаде напочвенного покрова варьирует от 41,4 % до 46,5 %, азота – от 1,4 % до 1,7 %. Для различных эколого-ценотических групп напочвенного покрова концентрация углерода и азота характеризуется низкой вариабельностью – 5 % и 12 % соответственно. Растения бореальной (*Equisetum sylvaticum*, *Pyrola rotundifolia*), неморальной (*Asarum europaeum*, *Aegopodium podagraria*) и нитрофильной (*Filipendula ulmaria*, *Lysimachia vulgaris*) групп характеризуются узким отношением C/N (26 – 28), широкое отношение C/N установлено для высокотравья (*Aconitum septentrionale*, *Urtica dioica*) – 32,1±1,8.

Луговой БГЦ отличается опадом более высокого качества по сравнению с лесными БГЦ. В луговом БГЦ средневзвешенная концентрация азота в растительном опаде на 20 % выше, а соотношение C/N в 1,3 раз уже, чем в березняках (рисунок 4.1).

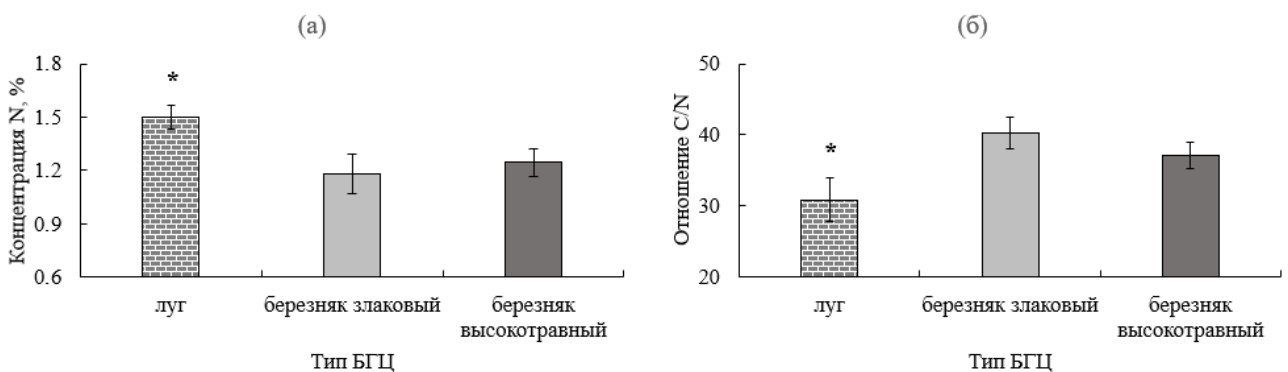


Рисунок 4.1 – Средневзвешенная концентрация азота (а) и отношение C/N (б) в опаде.

* – p < 0,05 при сравнении между лугом и медколиственными БГЦ. Планки погрешности показывают стандартную ошибку среднего.

4.2 Поток углерода с опадом

Суммарный поток углерода с опадом на лугу составляет 1773,4 кг/(га год), что в 1,6 раза выше, чем в мелколиственных БГЦ (рисунок 4.2), – главным образом за счёт вклада напочвенного покрова. Для луга опад представлен исключительно напочвенным покровом. С появлением древесно-кустарникового яруса доля опада напочвенного покрова снижается, а вклад древесно-кустарникового опада, напротив, растёт. В березняках доля древесно-кустарникового опада составляет 60 % от общего поступления, из которых от 10 % до 25 % приходится на трудноразлагаемые фракции опада.



Рисунок 4.2 – Поступление углерода с опадом.

$p < 0,05$ при сравнении между: * – лугом и березняками. а – неактивной фракцией древесно-кустарникового опада мелколиственных БГЦ. Планки погрешности показывают стандартную ошибку среднего.

Качественные и количественные характеристики опада влияют на аккумуляцию углерода в горизонте подстилки: ежегодное поступление углерода с опадом в мелколиственных биогеоценозах составляет 31 % – 50 % от запаса углерода подстилки, на лугу – 84 %. В березняке злаковом запас углерода в подстилке вдвое выше (3,6 т С/га), а в слое 0 – 5 см на 30 % ниже (11,3 т С/га), чем в березняке высокотравном за счет большего (в 2,7 раз) поступления неактивных

фракций опада (таблица 4.2) (Гичан и др., 2026). Следует отметить высокую пространственную вариабельность в поступлении углерода с преобладающими неактивными фракциями: коэффициент вариации (CV) для веток березы и ивы составляет 62,3 % и 70,4 %. Количество углерода активных фракций значимо не различалось для исследуемых БГЦ и в среднем составляет 576,2 кг С/(га год). В березняке злаковом и высокотравном доля поступления углерода с активными фракциями составляет 75,2 % и 89,3 % соответственно.

Таблица 4.2 – Поступление углерода с древесно-кустарниковым опадом (кг С/(га год), в числителе) и вклад фракций опада (% в знаменателе).

Фракция		Биогеоценоз	
		Березняк злаковый	Березняк высокотравный
Неактивные фракции	Ветки березы	$\frac{175,3 \pm 20,6}{23,3}$	$\frac{45,1 \pm 5,3}{6,9}$
	Ветки ивы	$\frac{6,9 \pm 1,7}{0,9}$	$\frac{20,9 \pm 6,7}{3,2}$
	Ветки осины	$\frac{0,3 \pm 0,1}{0,1}$	-
	Кора березы	$\frac{2,8 \pm 0,4}{0,4}$	$\frac{2 \pm 0,1}{0,3}$
	Прицветные чешуйки	$\frac{1,1 \pm 0,7}{0,1}$	$\frac{2,3 \pm 0,1}{0,4}$
	Итого неактивные фракции	$\frac{186,4 \pm 23,5}{24,8}$	$\frac{70,3 \pm 12,1}{10,7}$
Активные фракции	Листья березы	$\frac{478,9 \pm 23,9}{63,6}$	$\frac{439,5 \pm 0,1}{67}$
	Листья ивы	$\frac{31 \pm 6,7}{4,1}$	$\frac{86,5 \pm 17,8}{13,2}$
	Листья ольхи	$\frac{32,8 \pm 8,5}{4,4}$	$\frac{25,6 \pm 6,2}{3,9}$
	Листья осины	$\frac{8,4 \pm 0,1}{1,1}$	$\frac{0,5 \pm 0}{0,1}$
	Почки	$\frac{6,1 \pm 5,7}{0,8}$	$\frac{12,6 \pm 0,2}{1,9}$
	Семена березы	$\frac{2,2 \pm 0,7}{0,3}$	$\frac{2 \pm 0,7}{0,3}$
	Тычиночные сережки	$\frac{7,1 \pm 1,7}{0,9}$	$\frac{18,7 \pm 5,8}{2,9}$
	Итого активные фракции	$\frac{566,5 \pm 47,2}{75,2}$	$\frac{585,3 \pm 30,8}{89,3}$
Сумма		$\frac{752,9 \pm 40,2}{100}$	$\frac{655,6 \pm 28,3}{100}$

Примечание: \pm – стандартная ошибка среднего. Серая заливка ячеек – $p < 0,05$ при сравнении между березняком злаковым и высокотравным.

Преобладающая активная фракция древесно-кустарникового опада для каждого из исследуемых мелколиственных БГЦ – листья березы, вклад которой составляет 63,6 % – 67,0 %. В березняке высокотравном значительная доля активной фракции представлена листьями ивы – 13,2 %. Участие остальных активных фракций опада не превышает 5 %. Преобладающая неактивная фракция древесно-кустарникового опада – березовые ветки, доля которой для березняка злакового – 23,3 %, для березняка высокотравного – 6,9 %. Остальные неактивные фракции составляют не более 4,0 %.

В березняке злаковом поступление углерода с ветками березы составляет 175,3 кг С/(га год), что в 3,8 раза больше, чем в березняке высокотравном. При этом привносится больше углерода с корой березы и листьями осины – на 0,8 и 7,9 кг С/(га год) соответственно. Большее поступление углерода с ивовыми фракциями (ветками и листьями ивы – в 3 и 2,8 раза соответственно) зафиксировано в березняке высокотравном по сравнению с березняком злаковым. В данном БГЦ отмечается большой опад кроющих чешуек и тычиночных сережек (таблица 4.2).

Как упоминалось ранее, концентрация углерода в растительном опаде характеризуется низкой вариабельностью (CV от 5 % до 11 %). Различия для потока углерода с отдельными фракциями опада обусловлены объемами поступления данных фракций. Следовательно, поток углерода с древесно-кустарниковым опадом обусловлен продуктивностью, возрастом и видовым составом растительных сообществ. Например, в березняке высокотравном доля участия ивы козьей в составе древостоя в 4 раза больше, чем в березняке злаковом, поэтому здесь зафиксировано большее поступление фракций ивы. В свою очередь, меньший возраст и большая густота древостоя в березняке злаковом, по сравнению с березняком высокотравным, объясняют большую долю веток березы в опаде.

В мелколиственных БГЦ древесная растительность формирует характерные для данных БГЦ условия среды (световой, температурный, водный режим), в результате чего в составе напочвенного покрова появляются типичные для лесных фитоценозов виды: *Equisetum sylvaticum*, *Anthriscus sylvestris*. Также в данных БГЦ

существует конкуренция за питательные вещества между древесными растениями и напочвенным покровом. Такие условия объясняют меньшую фитомассу и объем опада напочвенного покрова в лесных БГЦ по сравнению с лугом.

4.3 Месячная динамика поступления углерода с опадом

Динамика поступления углерода с древесно-кустарниковым опадом во многом определяется фенологическими процессами: листопадом в сентябре и отсутствием вегетативных и генеративных органов в период покоя. Наибольшее количество опада для березняка злакового и березняка высокотравного приходится на сентябрь – в среднем 252,6 кг С/(га мес). Для каждого из исследуемых БГЦ период покоя (ноябрь – апрель) характеризуется минимальным количеством опада – в среднем 4,9 кг С/(га мес) (рисунок 4.3).

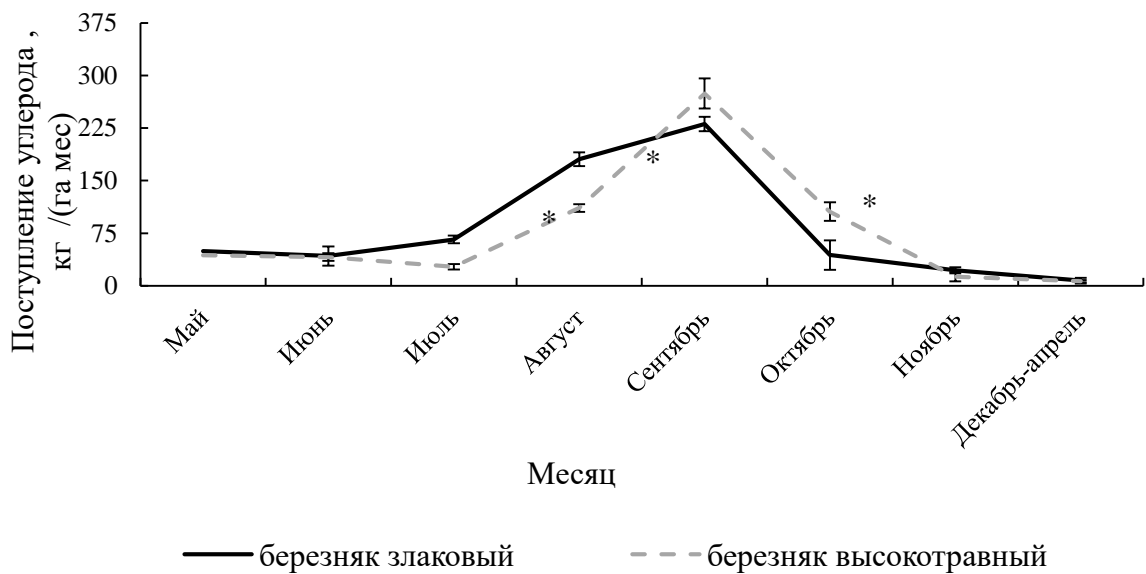


Рисунок 4.3 – Месячная динамика поступления углерода с древесно-кустарниковым опадом.
* – $p < 0,05$ при сравнении между березняком злаковым и березняком высокотравным. Планки погрешности показывают стандартную ошибку среднего.

Поступление углерода с опадом плавно увеличивается с мая по июль, в среднем на 10,9 кг С/га с каждым месяцем. Однако, для березняка высокотравного в июле наблюдается меньшее поступление углерода с древесно-кустарниковым опадом по сравнению с соседними месяцами (24,1 кг С/(га мес)). С июля наблюдается значительный восходящий тренд, достигающий своего максимума в

сентябре. Поток углерода с древесно-кустарниковым опадом в сентябре для березняка злакового и березняка высокотравного в 3,5 и 10,1 раза соответственно больше по сравнению с поступлением в мае – июле. С сентября по апрель происходит снижение анализируемого показателя до 1,8 кг С/(га мес).

С мая по июль доля углерода, привносимого древесно-кустарниковым опадом, в березняке злаковом составляет 26 % от годового поступления, в березняке высокотравном – 20 %. При этом 60 % для обоих мелколиственных БГЦ приходится на период с августа по сентябрь. В октябре поток углерода с древесно-кустарниковым опадом для березняка злакового и березняка высокотравного составляет 6,7 % и 16,6 % соответственно. В период покоя (ноябрь – апрель) поступление минимально для двух березняков и не превышает 5 % от значения за год. Таким образом, в июле и августе поток углерода с опадом в березняке злаковом в 2,4 и 1,6 раза соответственно больше по сравнению с березняком высокотравным, в октябре выявлена обратная закономерность с разницей в 2,4 раза.

Интенсивное поступление активной фракции наблюдается к концу вегетационного периода (рисунок 4.6а). Для березняка злакового 80 % активной фракции опадает с июля по сентябрь, для березняка высокотравного – с августа по октябрь. В июле и августе количество активных фракций в березняке злаковом в 3,4 и 1,6 раза соответственно больше по сравнению с березняком высокотравным. В мае и в период с октября по ноябрь отмечена обратная закономерность: поступление активных фракций в березняке высокотравном в 2,1–4,5 раза больше по сравнению с березняком злаковым. Преобладающими активными фракциями являются листья березы и ивы. Динамика поступления углерода с активной фракцией и с листьями березы имеют одинаковые закономерности, что связано с преобладанием (80 %) листьев березы в активной фракции (приложение В, рисунок В1). Поступление углерода с листьями ивы в березняке высокотравном в сентябре и октябре на 34,1 и 26,8 кг С/(га мес) соответственно больше по сравнению с березняком злаковым. Также между исследуемыми БГЦ выявлены различия в мае, июле, августе и ноябре, но различия по поступлению углерода в данные месяцы не превышают 5,2 кг С/(га мес).

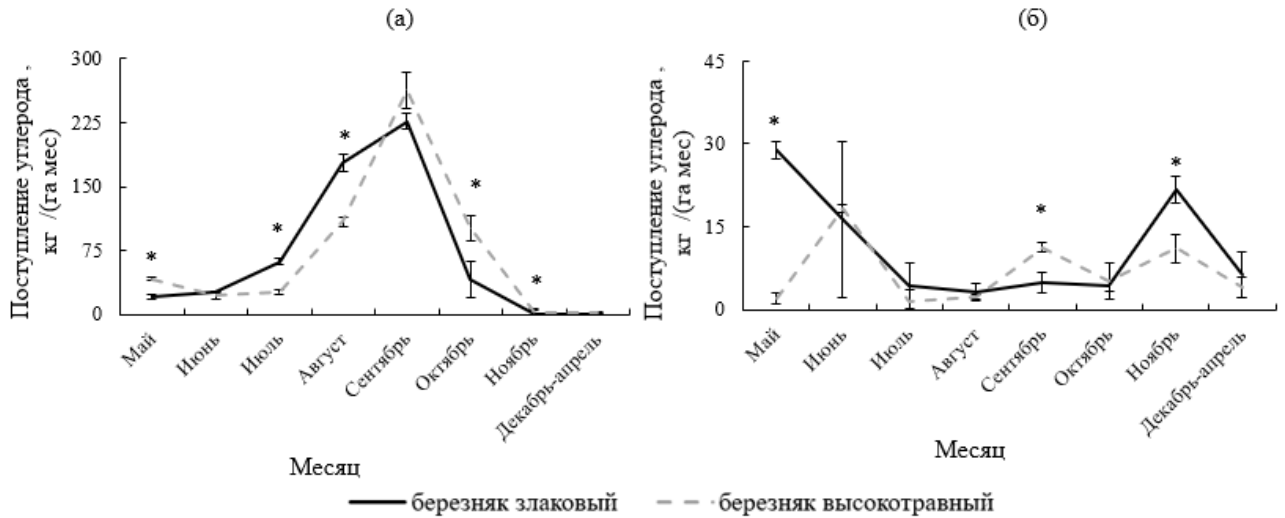


Рисунок 4.6 – Месячная динамика поступления углерода с активными (а) и неактивными (б) фракциями древесно-кустарникового опада.

* – $p < 0,05$ при сравнении между березняком злаковым и березняком высокотравным. Планки погрешности показывают стандартную ошибку среднего.

В мае и ноябре поток углерода с неактивными фракциями опада в березняке злаковом в 13,7 и 2,0 раза соответственно больше по сравнению с березняком высокотравным. В сентябре отмечена обратная закономерность: поступление в березняке высокотравном в 2,3 раза больше (рисунок 4.6б). Различия потоков углерода с опадом неактивных фракций в ноябре обусловлены долей веток березы, в сентябре – веток ивы, в мае – как веток березы, так и веток ивы (приложение В, рисунок В1). Различия по поступлению углерода с ветками березы в мае и ноябре идентичны различиям по потоку углерода с неактивными фракциями. Поступление углерода с ветками ивы в период с июля по ноябрь для березняка высокотравного в среднем в 7,5 раза выше по сравнению с березняком злаковым. Поток углерода с листьями ивы в мае больше в березняке злаковом по сравнению с березняком высокотравным – 0,6 кг С/(га мес).

Выводы к главе 4

1. Поток углерода с опадом на лугу составляет 1,8 т С / (га год), что в 1,6 раза выше, чем в мелколиственных БГЦ. Луговой БГЦ отличается опадом более высокого качества по сравнению с лесными БГЦ. В луговом БГЦ

средневзвешенная концентрация азота в растительном опаде на 20 % выше, а отношение C/N в 1,3 раза уже, чем в березняках. В березняках доля древесно-кустарникового опада составляет 60 % от общего опада, из которых от 10 % до 25 % приходится на трудноразлагаемые фракции. Качественные и количественные характеристики опада влияют на аккумуляцию углерода в горизонте подстилки: ежегодное поступление углерода с опадом в мелколиственных биогеоценозах составляет 31 % – 50 % от запаса углерода подстилки, на лугу – 84 %.

2. Выявлены различия в поступлении углерода с неактивными фракциями опада между мелколиственными БГЦ. Поток углерода с неактивными фракциями опада в 15-летнем березняке злаковом в 2,7 раза больше, чем в 25-летнем березняке высокотравном, что обусловлено большей густотой древостоя и процессами самоизреживания древостоев.

3. Выявлены различия в поступлении отдельных фракций древесно-кустарникового опада. Березняк злаковый, в отличие от березняка высокотравного, характеризуется большим потоком углерода с ветками березы, корой березы, листьями осины и меньшим с ивовыми фракциями (ветвей и листьев) и тычиночными сережками. Различия по поступлению углерода с отдельными фракциями древесно-кустарникового опада обусловлены фитомассой, которая, в свою очередь, определяется продуктивностью, возрастом и видовым составом древостоя.

4. Максимум поступления углерода с опадом в березняках приходится на конец вегетационного периода – сентябрь: 35 % – 43 % от годового объема поступления углерода с опадом. Период покоя характеризуется минимальным поступлением опада (3 % – 5 %).

5. Принадлежность опада к группе активной или неактивной фракции определяется концентрацией азота в нем, т.к. концентрация углерода в различных фракциях растительного опада характеризуется низкой вариабельностью – от 5 % до 11 %, в то время как уровень варьирования в концентрации азота высокой – 55 %.

ГЛАВА 5. ЭМИССИЯ CO₂ ИЗ ПОЧВ

5.1 Поток CO₂ из почв за вегетационный период

Эмиссия CO₂ из почвы за вегетационный период (май – октябрь) 2023 – 2025 гг. значимо не различается в исследуемых БГЦ, варьируя от 8,4 до 9,2 т С/га (рисунок 5.1). Известно, что продуцирование CO₂ из почвы в период покоя в постагрогенных экосистемах южной тайги составляет в среднем 23,5 % от годовой (Kurganova et al., 2003), поэтому годовая величина потока для исследуемых объектов оценивается в 11,0 – 12,0 т С/(га год).

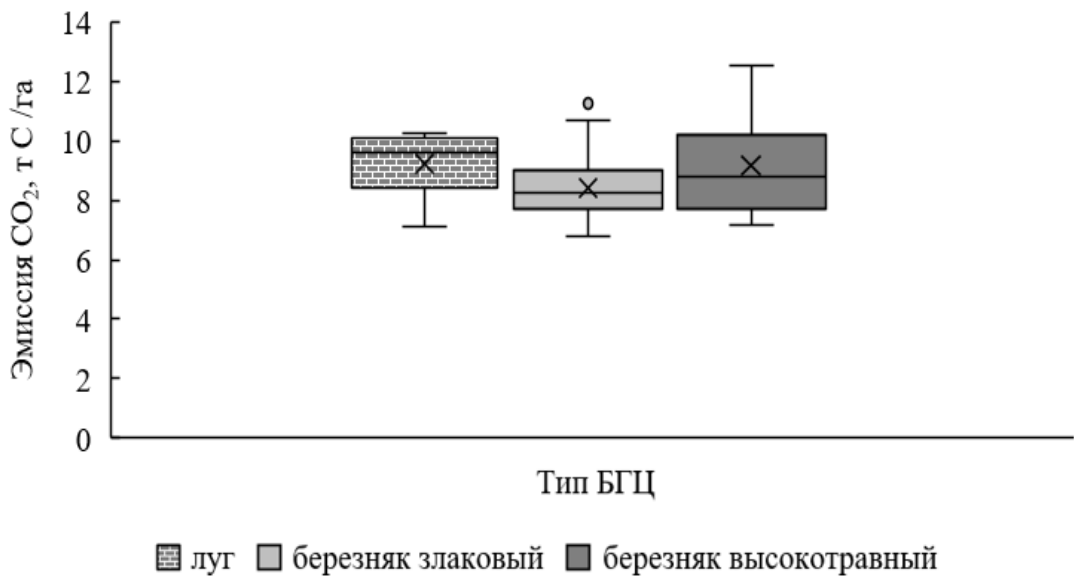


Рисунок 5.1 – Эмиссия CO₂ из почвы за вегетационный период. Планки погрешности показывают стандартную ошибку среднего.

Месячная динамика эмиссии CO₂ с мая по август имеет различные тренды в зависимости от типа БГЦ (рисунок 5.2), что обусловлено несколькими факторами: динамикой температуры воздуха и почвы, влажностью почвы, деятельностью почвенной биоты, физическими и химическими свойствами почв и влиянием растительных сообществ (Кудеяров и др., 2007; Xu and Shang, 2016). Растительность оказывает как непосредственное влияние на эмиссию CO₂ через качественные и количественные показатели опада и деятельность корневых систем, так и косвенное воздействие, регулируя температурный и гидрологический

режимы, а также влияя на почвенную биоту (Сушко и др., 2019; Курганова и др., 2021).

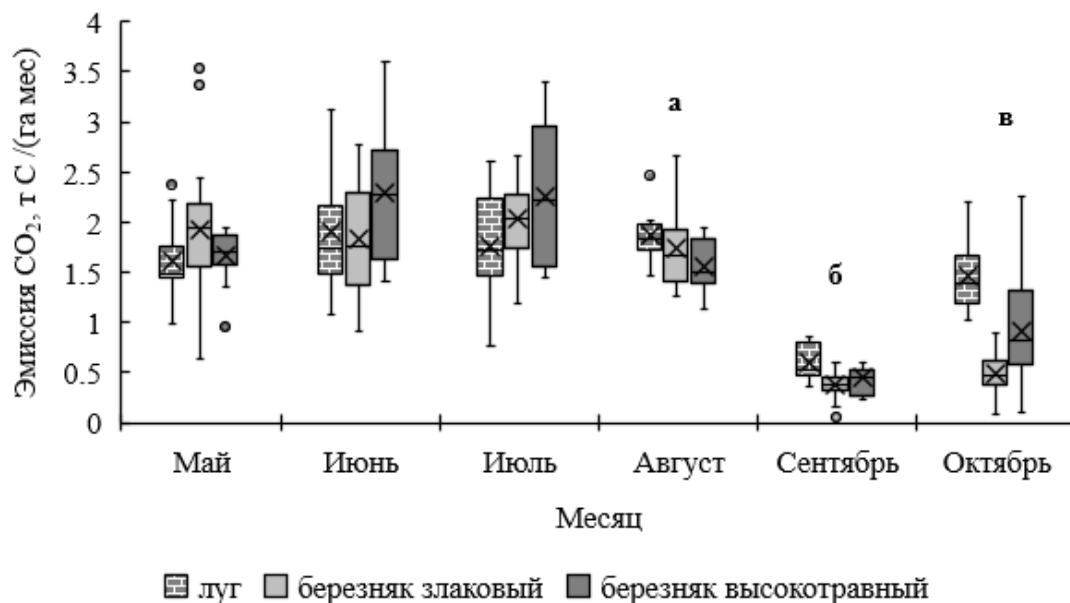


Рисунок 5.2 – Месячная динамика эмиссии CO₂ из почвы за вегетационный период. $p < 0,05$ при сравнении между: а – лугом и березняком высокотравным, б – лугом и березняками, в – каждым из БГЦ. Планки погрешности показывают стандартную ошибку среднего.

В березняке злаковом потоки с мая по июнь не различаются, варьируя от 1,7 до 2,0 т С/(га мес), с пиком эмиссии CO₂ в июле – 2,0 т С/(га мес). В августе поток уменьшается до 1,7 т С/(га мес). На лугу почвенное дыхание с мая по август не различается, значения составляют 1,6 – 1,9 т С/(га мес), с максимальными показателями в июне – 1,9 т С/(га мес). В березняке высокотравном пик эмиссии CO₂ наблюдается в июне и июле – 2,3 т С/(га мес), поток в мае и августе в 1,4 и 1,5 раза соответственно меньше по сравнению с потоками в июне – июле. Для всех БГЦ наблюдается снижение эмиссии CO₂ в сентябре на 67 % – 78 %. Этот месяц характеризуется минимальной величиной почвенного дыхания: в мелколиственных БГЦ – 0,4 т С/(га мес), на лугу – 0,6 т С/(га мес). Во всех объектах эмиссия CO₂ увеличивается с сентября по октябрь на 0,2 – 0,9 т С/(га мес). В период сентябрь – октябрь происходит снижение температур воздуха и почвы, за счет чего замедляются биохимические процессы в растительных сообществах; также увеличивается количество осадков. Как следствие, снижается корневое дыхание и активность почвенной биоты, что обуславливает низкие потоки эмиссии CO₂ в

сентябре. В сентябре поступает основная масса опада, что в последствии способствует активации почвенных микроорганизмов и разложению опада, поэтому к октябрю наблюдается рост почвенного дыхания.

Месячная динамика почвенного дыхания с августа по октябрь значительно различается между исследуемыми БГЦ. В августе поток CO_2 из почвы на лугу составляет 1,9 т С/(га мес), что в 1,2 раза больше по сравнению с березняком высокотравным. В сентябре и октябре почвенное дыхание в луговом БГЦ больше, чем в лесных типах БГЦ в 1,5 – 2,3 раза. Такая закономерность устойчиво проявляется в течение всех трех лет мониторинга, что подтверждает влияние растительности на эмиссию CO_2 . В октябре эмиссия CO_2 для березняка высокотравного в 1,8 раз больше по сравнению с березняком злаковым. Наибольшее поступление опада приходится на август – октябрь, качество опада значительно различается в исследуемых БГЦ: луговой БГЦ характеризуется большим поступлением легкоразлагаемого опада по сравнению с мелколиственными (см. главу 4). В октябре отмечено большее поступление активных фракций опада в березняке высокотравном по сравнению с березняком злаковым (см. главу 4). Таким образом выявленные различия в эмиссии CO_2 между БГЦ главным образом обусловлены влиянием растительности – качественными и количественными характеристиками опада, а также месяцем его поступления.

Эмиссия CO_2 с мая по август составляет от 77 % до 89 % от потока за вегетационный период. Поток за сентябрь в среднем составляет 4 % – 6 % от вегетационного периода, в то время как на октябрь приходится 6 % – 10 % для лесных БГЦ и 16 % для луга.

Почвенное дыхание характеризуется высокой пространственной и временной вариабельностью. Пространственная вариабельность для лесных БГЦ составляет 27 %, для луга – 35 %. Временная вариабельность варьирует от 25 % до 65 %, наибольший CV (65 %) наблюдается в октябре.

5.2 Влияния влажности почвы и температуры на эмиссию CO₂

Принято считать, что основными абиотическими факторами, определяющими поток CO₂ из почвы, являются: температура воздуха и почвы, а также влажность почвы (Davidson, Janssens, 2006; Bond-Lamberty, Thomson, 2010). Однако, полученные нами результаты свидетельствуют о слабой связи между почвенным дыханием и объемной влажностью почвы на глубине 5 см, корреляция составляет от -0,04 до 0,14 (рисунок 5.3). Лесные и луговые БГЦ не испытывают дефицита влаги даже в летние месяцы: в июле и августе объемная влажность почвы не опускается ниже 20 %, а поступление атмосферных выпадений составляет в среднем 67 л/(м² мес) (см. главу 6). Почвенное дыхание на лугу отличается более слабой корреляцией с температурой воздуха ($r = 0,13$) и почвы на глубине 5 см ($r = 0,09$), по сравнению с мелколиственными БГЦ, в которых корреляция с температурой воздуха составляет 0,33 – 0,41, а с температурой почвы на глубине 5 см – 0,26 – 0,27 (рисунок 5.3). Для луга, березняка злакового и березняка высокотравного коэффициент Q_{10} для температуры воздуха составляет: 1,13, 1,73 и 1,57 соответственно, для температуры почвы на глубине 5 см: 1,18, 1,87 и 1,78. Более выраженная корреляция почвенного дыхания с температурой в березняках по сравнению с лугом, обусловлена влиянием лесной растительности на температурный режим, в лесных БГЦ более сглажена суточная амплитуда температур, менее выражены сезонные колебания температуры (Мелехов, 1980). Достаточное увлажнение также может обуславливать снижение температурного отклика почвенного дыхания (Davidson, et al., 2006; Kurganova et al., 2022). Для мелколиственных БГЦ была установлена отрицательная связь ($r = -0,31$) между почвенным дыханием и поступлением неактивных фракций в осенние месяцы (сентябрь-октябрь).

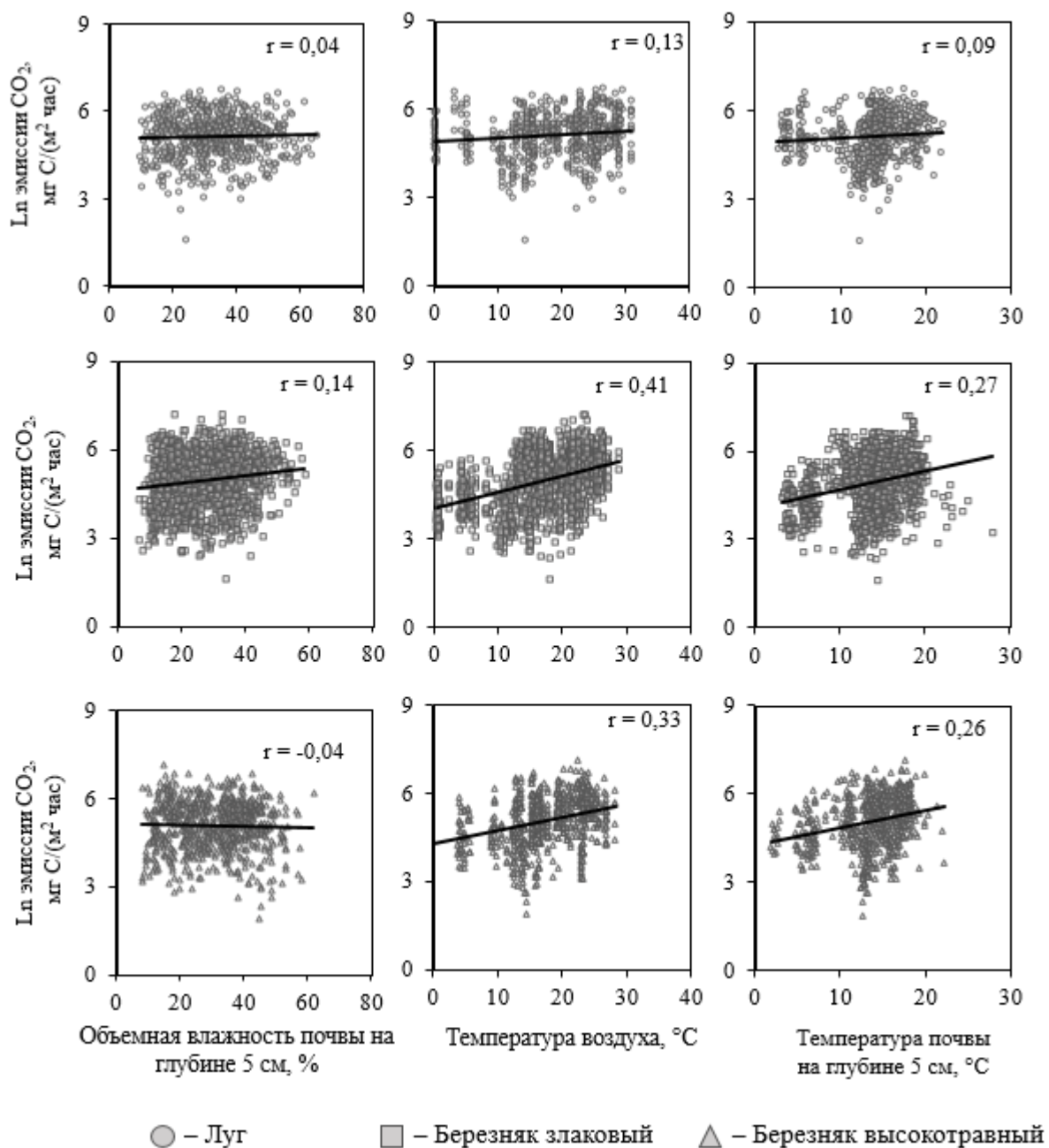


Рисунок 5.3 – Связь почвенного дыхания с температурой воздуха, почвы и влажности почвы.
 $n = 246, p < 0,05$

Выводы к главе 5

1. Эмиссия CO_2 из почвы за вегетационный период для постагрогенных луговых и мелколиственных БГЦ значимо не различается и варьирует в диапазоне от 8,4 до 9,2 т С/га. При этом в августе – октябре эмиссия CO_2 для луга в 1,2 – 2,3 раза больше по сравнению с мелколиственными БГЦ.

2. Обнаружены различия в эмиссии CO_2 между мелколиственными БГЦ в октябре. Для березняка высокотравного почвенное дыхание в 1,8 раз больше по сравнению с березняком злаковым.

3. Выявленные различия в эмиссии CO_2 между БГЦ, главным образом, обусловлены влиянием растительности – качественными и количественными характеристиками опада, а также месяцем его поступления.

4. Для мелколиственных экосистем выявлена средняя положительная корреляция почвенного дыхания с температурным режимом и отрицательная – с поступлением неактивных фракций опада.

ГЛАВА 6. ПОТОКИ РАСТВОРЕННОГО ОРГАНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА

6.1 Объемы атмосферных выпадений и лизиметрических вод

Годовое поступление атмосферных выпадений значимо не различается между БГЦ и в среднем составляет: 507,8 л/(м² год). Аналогичная закономерность наблюдается как для вегетационного периода, так и для периода покоя – 316,1 и 191,7 л/(м² год) соответственно (таблица 6.1). За вегетационный период выпадает 57 % – 70 % годового объема воды.

Таблица 6.1 – Средние трехлетние значения объемов атмосферных выпадений и лизиметрических вод, л/м².

Период	Биогеоценоз		
	Луг	Березняк злаковый	Березняк высокотравный
Атмосферные выпадения			
Вегетационный период	334,7±35,4	303,2±6,9	310,2±19,1
Период покоя	143,4±19,5	196,1±20,6	235,8±12,5
Сумма за год	478,2±49,4	499,3±23,4	546,0±26,5
Лизиметрические воды с глубины 10 см			
Вегетационный период	117,2±6,4	81,1±4,8	102,5±8,3
Период покоя	145,9±0,9	119,2±3,8	113,0±30,1
Сумма за год	263,2±7,1	200,3±7,4	215,5±37,1
Лизиметрические воды с глубины 30 см			
Вегетационный период	89±32,1	42,3±8	51,9±10,8
Период покоя	162±9,9	127,7±3,9	135,1±3,7
Сумма за год	236,2±39,1	170±9,3	187,1±10,2

Примечание: оценки объемов за вегетационный период (май–октябрь) и период покоя (ноябрь–апрель) представлены в виде суммы потоков за 6 мес. Серая заливка ячеек – $p < 0,05$ при сравнении между лугом и березняком злаковым. ± – стандартная ошибка среднего.

Годовой объем лизиметрических вод с глубины 10 см достигает 226,3 л/(м²·год). Годовое удержание воды в слое На долю вегетационного периода и периода покоя в среднем приходится 44 % и 56 % от годового объема соответственно (таблица 6.1). Не выявлено существенных различий в объемах лизиметрических вод с глубины 10 см между исследуемыми БГЦ за год, период покоя и вегетации.

На глубине 30 см суммарный годовой поток лизиметрических вод на лугу на 20 % – 28 % больше, чем в мелколиственных БГЦ (таблица 6.1). За вегетационный

период значимые различия не выявлены, но наблюдается тенденция к большему выносу на лугу (на 53 %). Объем за вегетационный период составляет от 62 % до 75 % от годового объема. В период покоя количество лизиметрических вод на лугу в 1,2 раза больше по сравнению с мелколиственными БГЦ.

Для БГЦ всех типов годовое поступление атмосферных выпадений преобладает над их миграцией с лизиметрическими водами из минеральных слоев почв 10 и 30 см. Достигая почвы, поступающие атмосферные выпадения перехватываются подстилкой, которая замедляет её проникновение и обеспечивает равномерное распределение. Лесная подстилка лучше задерживает почвенную воду по сравнению с луговым очесом (Сукачев, 1964; Смагин, 2011). Также в лесных БГЦ происходит перехват почвенной влаги корневыми системами древесных растений (Verstraeten et al., 2014). Для десятисантиметрового слоя почвы величина удержания воды в мелколиственных БГЦ составляет 60 % относительно поступающих атмосферных выпадений, в то время как для лугового БГЦ удержание на 15% меньше. Для тридцатисантиметрового слоя почвы удержания воды относительно поступающих атмосферных выпадений в мелколиственных БГЦ на 5% больше чем на лугу. Аналогичная закономерность наблюдается для периода вегетации: удержание воды для мелколиственных БГЦ в десяти- и тридцатисантиметровом слое почвы на 6 и 11 % соответственно больше, чем на лугу. Важно отметить, что в период вегетации для березняка злакового перехват почвенной влаги в десятисантиметровом слое почвы на 6% больше, чем для березняка высокотравного, удержание воды для 30см слоя почв не различается между мелколиственными БГЦ. В период покоя для луга наблюдаются преобладание выноса лизиметрических вод с глубины 10 и 30 см над поступлением атмосферных выпадений, потери составляют 2 и 13% соответственно, в то время как для мелколиственных БГЦ наблюдается удержание влаги почвой: 45% для десятисантиметрового слоя и 39% для тридцатисантиметрового слоя.

Объем атмосферных выпадений характеризуется выраженной сезонной динамикой (рисунок 6.1). Максимальные значения наблюдаются в августе (от 70,4 до 79,6 л/(м² мес.)), минимальные – в период с декабря по апрель (23 –

32 л/(м² мес.)). Как упоминалось ранее, количество атмосферных выпадений за вегетационный период не различается между БГЦ, однако, в июне и июле были обнаружены значимые различия. В эти месяцы поступление атмосферных выпадений на лугах в 1,3 раза больше по сравнению с березняком злаковым. Выявленная закономерность объясняется перехватом атмосферных выпадений пологом леса.

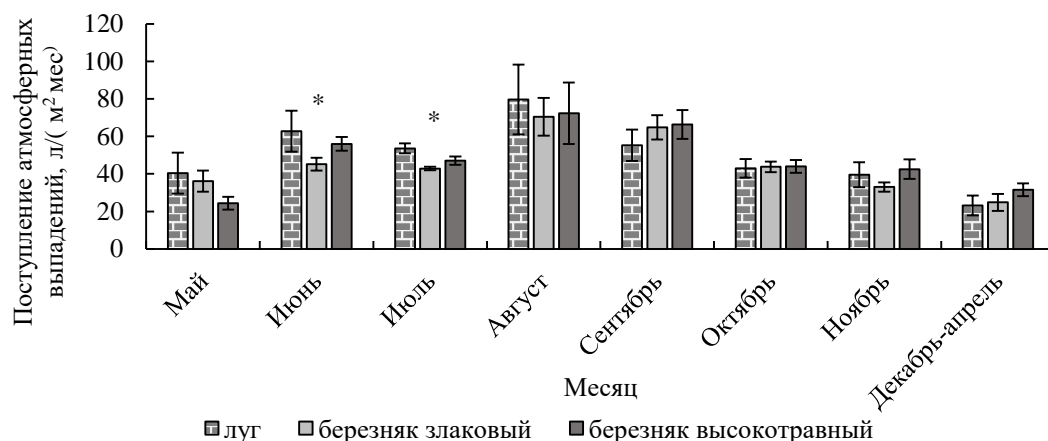


Рисунок 6.1 – Сезонная динамика атмосферных выпадений.

* – $p < 0,05$ при сравнении между лугом и березняком злаковым. Планки погрешности показывают стандартную ошибку среднего.

На глубине 10 см максимальный объем лизиметрических вод для мелколиственных БГЦ наблюдается в августе – 38,2 л/(м² мес), для луга в августе и ноябре – в среднем 45,1 л/(м² мес.) (рисунок 6.2). В октябре зафиксирован минимальные объемы лизиметрических вод для БГЦ всех типов – 0,33 л/(м² мес.). Анализ месячной динамики показал, что между исследуемыми БГЦ миграция почвенных вод не различается на протяжении всего периода мониторинга.

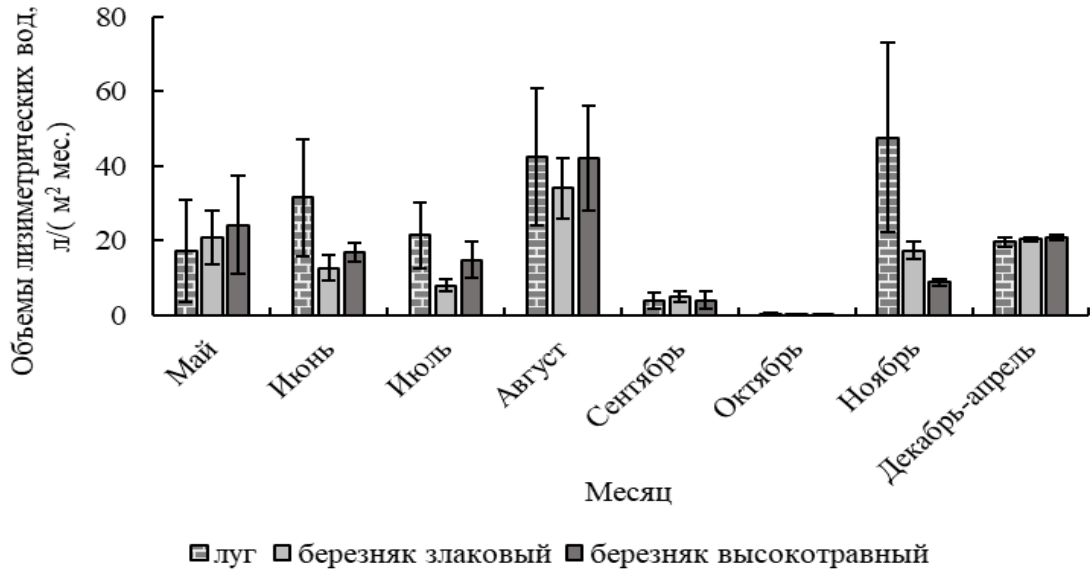


Рисунок 6.2 – Сезонная динамика лизиметрических вод с глубины 10 см. Планки погрешности показывают стандартную ошибку среднего.

Минимальные объемы почвенных вод на глубине 30 см для всех БГЦ отмечены в октябре и не превышают 0,2 л/(м² мес.) (рисунок 6.3). Для березняка злакового малые объемы также зафиксированы в июне и июле – 4,2 л/(м² мес.), для березняка высокотравного только в июле – 3,2 л/(м² мес.). В ноябре отмечены максимальные объемы лизиметрических вод (35,6 – 68,5 л/(м² мес.)). Сравнение между БГЦ показало, что в июле, сентябре и ноябре объем лизиметрических вод на глубине 30 см на лугах в 5,5, 24,9 и 1,8 раз соответственно больше по сравнению с лесными БГЦ. В июне выявлены значимые различия при сравнении между березняком злаковым и остальными БГЦ, для которых вынос в 1,7 раз больше. Важно отметить, что в данный месяц наблюдается тренд на увеличение объема в ряду: березняк злаковый < березняк высокотравный < луг от 2,8 до 28,1 л/(м² мес.).

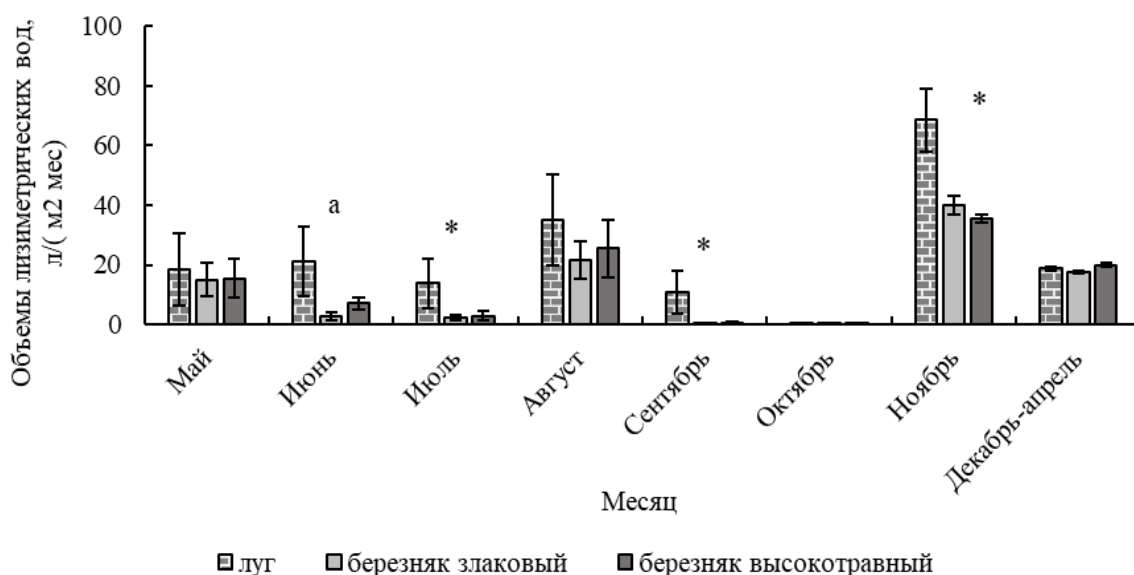


Рисунок 6.3 – Сезонная динамика лизиметрических вод с глубины 30 см. $p < 0,05$ при сравнении между: * – лугом и березняками, а – березняком злаковым и остальными БГЦ. Планки погрешности показывают стандартную ошибку среднего.

6.2 Концентрации растворенного органического углерода в атмосферных выпадениях и лизиметрических водах

Среднегодовые концентрации РОУ в атмосферных выпадениях мелколиственных БГЦ в 3,8 раз выше, чем в атмосферных выпадениях на лугу (таблица 6.2), что обусловлено обогащением атмосферных выпадений органическими соединениями при прохождении осадков сквозь кроны деревьев. Выявленная закономерность обусловлена различиями за вегетационный период, во время которого концентрации РОУ для лесов в 4 раза больше по сравнению с лугом.

Таблица 6.2 – Концентрации РОУ (мг/л) в атмосферных выпадениях и лизиметрических водах.

Период	Биогеоценоз		
	Луг	Березняк злаковый	Березняк высокотравный
1	2	3	4
Атмосферные выпадения			
Вегетационный период	3,4±0,3*	14,4±0,9	13,0±1,2
Период покоя	1,5±0,2	1,8±0,1	2,9±0,7
Среднее за год	2,9±0,2*	11,2±0,7	10,9±1,1
Лизиметрические воды с глубины 10 см			
Вегетационный период	21,8±0,9	17,4±0,2	11,6±0,4 ^a

Продолжение таблицы 6.2

1	2	3	4
Период покоя	18,5±1,3	17,7±0,9	14±0,2 ^a
Среднее за год	21±0,9	17,5±0,3	12,2±0,3 ^a
Лизиметрические воды с глубины 30 см			
Вегетационный период	11,8±0,5	9,9±0,3	7,7±0,3 ^b
Период покоя	9,6±1,1	7,9±0,4	6±0,2 ^a
Среднее за год	11,2±0,6	9,4±0,3	7,3±0,2 ^a

Примечание: приведены средние значения концентрации РОУ за вегетационный период (май–октябрь) и период покоя (ноябрь–апрель). Серая заливка ячеек – $p < 0,05$ при сравнении между: * – лугом и березняком злаковым, а – березняком высокотравным и остальными БГЦ; б – березняком высокотравным и лугом; в – каждым из БГЦ. ± – стандартная ошибка среднего.

В атмосферных выпадениях для БГЦ всех типов наблюдается более высокая концентрация РОУ в вегетационный период, по сравнению с периодом покоя. При этом различия между сезонами для мелколиственных БГЦ более выражены, чем для луга. Различия в концентрации РОУ в течение вегетационного периода и периода покоя для мелколиственных БГЦ составляют 11,3 мг/л, для луга – 2,0 мг/л. Во время периода покоя концентрация РОУ варьирует от 1,5 до 2,9 мг/л и значительно не различается между БГЦ.

В лизиметрических водах на глубине 10 см среднегодовая концентрация РОУ для березняка высокотравного меньше по сравнению с остальными БГЦ: в 1,4 раза по сравнению с березняком злаковым и в 1,7 раз по сравнению с лугом (таблица 6.2). Данная закономерность сохраняется как для периода вегетации, так и для периода покоя. Концентрация РОУ в лизиметрических водах с глубины 10 см для луга и березняка злакового не изменяется при сравнении вегетационного периода и периода покоя, в то время как для березняка высокотравного в вегетационный период концентрация РОУ на 15 % выше по сравнению с периодом покоя.

Среднегодовые концентрации РОУ в лизиметрических водах на глубине 30 см в березняке высокотравном в 1,3 – 1,5 раза меньше, чем в остальных БГЦ (таблица 6.2). В вегетационный период концентрация РОУ значительно различается между всеми исследуемыми БГЦ: на лугу на 16 – 34 % выше, чем в мелколиственных БГЦ; между березняком злаковым и березняком высокотравным различия составляют 22 %. В период покоя отмечалась меньшая концентрация РОУ

в березняке высокотравном по сравнению с остальными БГЦ, закономерность аналогична различиям по среднегодовым концентрации РОУ.

При прохождении атмосферных выпадений через горизонт подстилки и десятисантиметровую минеральную толщу почвы наблюдается повышение концентрации РОУ для луга, березняка злакового и березняка высокотравного на 18,1, 6,2 и 1,3 мг/л соответственно, что обусловлено качеством опада и подстилки (см. главу 4). Для исследуемых БГЦ при прохождении лизиметрических вод вниз по почвенному профилю с глубины 10 см до глубины 30 см концентрация РОУ в них снижается в 1,6 – 1,9 раз. При сравнении концентрации РОУ в атмосферных выпадениях и лизиметрических водах на глубине 30 см получены следующие результаты: на лугу концентрация РОУ увеличивается в 3,8 раз, в то время как для мелколиственных БГЦ концентрация РОУ снижается в 1,4 раза. Выявленные различия обусловлены влиянием растительных сообществ.

6.3 Сезонная динамика концентрации растворенного органического углерода в атмосферных выпадениях и лизиметрических водах

В атмосферных выпадениях мелколиственных БГЦ обнаружена высокая вариабельность концентраций РОУ в вегетационный период с максимумом в мае (43,8 мг/л) (рисунок 6.4). Для луга концентрации РОУ слабо различаются по месяцам. Максимум также наблюдается в мае (5,7 мг/л). Минимальная концентрация РОУ для всех БГЦ наблюдается в период с декабря по апрель (в среднем 1,0 мг/л). Сезонная динамика содержания РОУ в атмосферных выпадениях объясняется фенологическими процессами: весной, с началом сокодвижения и распусканием листьев, начинают работать механизмы вымывания РОУ с поверхности органов растений. При формировании генеративных органов формируется значительное количество пыльцы, из которой также может вымываться РОУ. Наибольшая концентрация РОУ в атмосферных выпадениях мелколиственных БГЦ согласуется с началом набухания почек и цветения у березы (Минин и др., 2017).

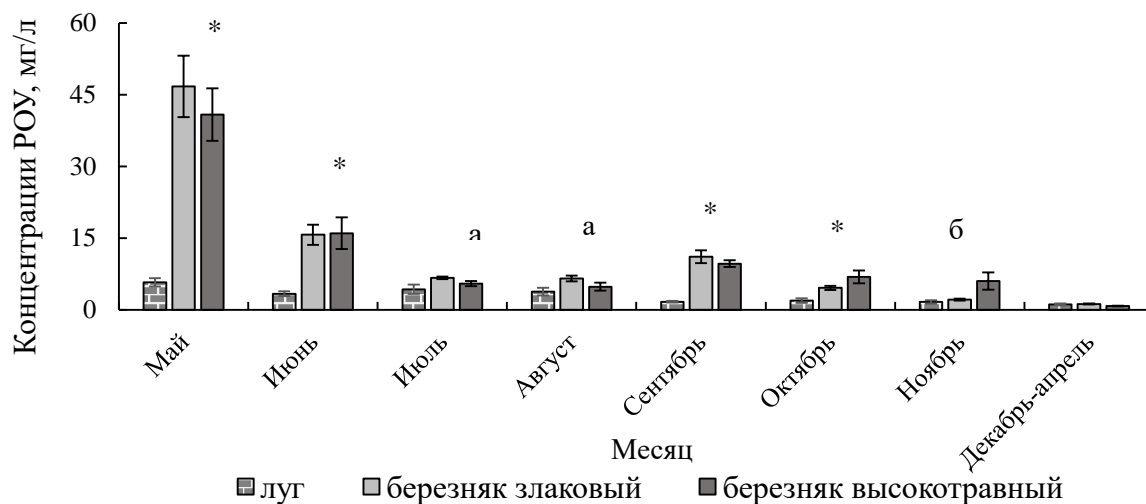


Рисунок 6.4 – Сезонная динамика концентраций РОУ в атмосферных выпадениях. $p < 0,05$ при сравнении между: * – лугом и березняками, а – березняком злаковым и остальными БГЦ, б – березняком высокотравным и лугом. Планки погрешности показывают стандартную ошибку среднего.

Концентрации РОУ в атмосферных выпадениях за вегетационный период в лесных БГЦ выше по сравнению с лугом (таблица 6.2), различия наиболее выражены в мае – июне (в 4,7 – 7,6 раз) и сентябре – октябре (в 2,9 – 6,5 раз) (рисунок 6.4). Атмосферные выпадения, проходя через древесный полог, обогащаются растворенными органическими веществами (Аржанова, Елпатьевский, 2005; Кузнецова и др., 2022). Повышение концентрации РОУ происходит за счет выделения растительными тканями органических веществ и их последующего вымывания (выщелачивания), а также за счет перемешивания дождевых вод с транспирационными водами растений (Аржанова, Елпатьевский, 2005). Это обуславливает значительно большие концентрации РОУ в атмосферных выпадениях лесных сообществ по сравнению с открытыми пространствами луга. В июле и августе содержание РОУ в атмосферных выпадениях березняка злакового на 18 % – 40 % выше, чем в остальных БГЦ. В период покоя значимые различия между БГЦ наблюдаются только в ноябре: концентрация РОУ для березняка высокотравного в 3,6 раз больше по сравнению с лугом.

Месячная динамика содержания РОУ в почвенных водах на глубине 10 см характеризуется различными тенденциями для каждого из исследуемых БГЦ (рисунок 6.5). Для березняка злакового максимальная концентрация РОУ

наблюдается в октябре (25,4 мг/л), минимальное – в июле (11,9 мг/л). Для березняка высокотравного наибольшее содержание РОУ приходится на ноябрь (19,7 мг/л), минимальные значения (8,2 – 8,4 мг/л) отмечены в июле, августе, а также в период с декабря по апрель. Для луга период с декабря по май характеризуется низкой концентрацией РОУ (13,6 – 13,9 мг/л), максимум приходится на сентябрь (25,4 мг/л). Для всех БГЦ наблюдается повышение содержания РОУ в лизиметрических водах (10 см) в период с августа по сентябрь, концентрации увеличиваются в 1,3 – 1,8 раз, что может быть связано с поступлением опада в данный период (см. главу 4). Концентрация РОУ в июле увеличивается в ряду березняк высокотравный < березняк злаковый < луг от 8,2 до 19,4 мг/л, а также в сентябре – от 13,5 до 31,9 мг/л. В июне содержание РОУ на лугу в 1,5 раза выше по сравнению с мелколиственными БГЦ. В августе и октябре концентрация РОУ в почвенных водах (10 см) березняка высокотравного в 1,7 – 2,2 раза меньше по сравнению с остальными БГЦ. С декабря по апрель содержание РОУ в почвенных водах березняка злакового в 2 раза больше по сравнению с березняком высокотравным.

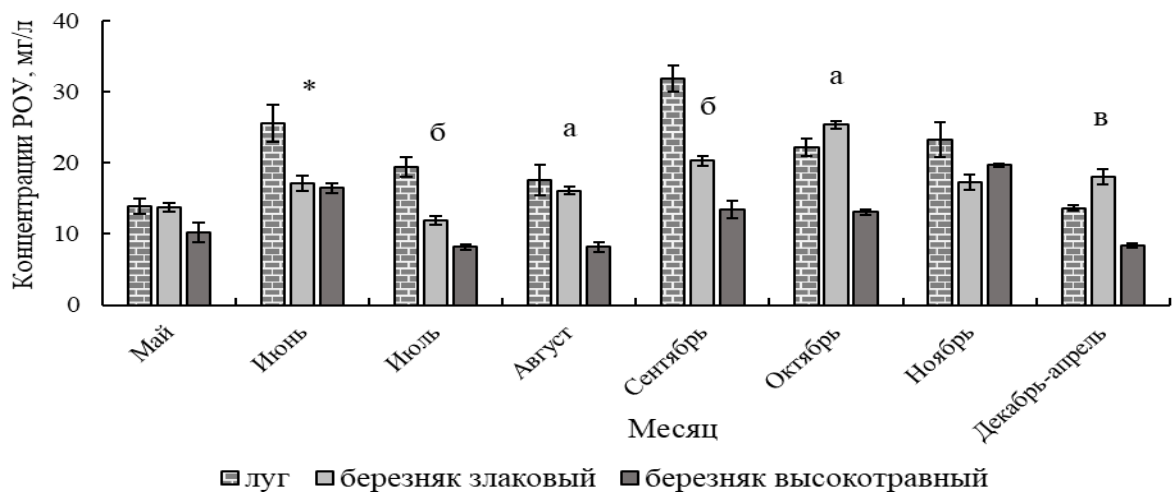


Рисунок 6.5 – Сезонная динамика концентраций РОУ в лизиметрических водах на глубине 10 см.

$p < 0,05$ при сравнении между: * – лугом и березняками, а – березняком высокотравным и остальными БГЦ, б – между каждым из БГЦ, в – между березняком злаковым и березняком высокотравным. Планки погрешности показывают стандартную ошибку среднего.

В июле содержание РОУ в лизиметрических водах на глубине 30 см увеличивается в ряду луг < березняк злаковый < березняк высокотравный от 8,5 до

13,2 мг/л (рисунок 6.6). В августе наблюдается аналогичная закономерность, концентрации РОУ увеличиваются от 10,4 до 15,4 мг/л. В сентябре концентрации РОУ в почвенных водах лугах на 5,8 мг/л больше по сравнению с лесными БГЦ. Для березняка высокотравного в июне, октябре и ноябре отмечена меньшая концентрация РОУ по сравнению с другими БГЦ в 1,5, 2,1 и 1,6 раз соответственно.

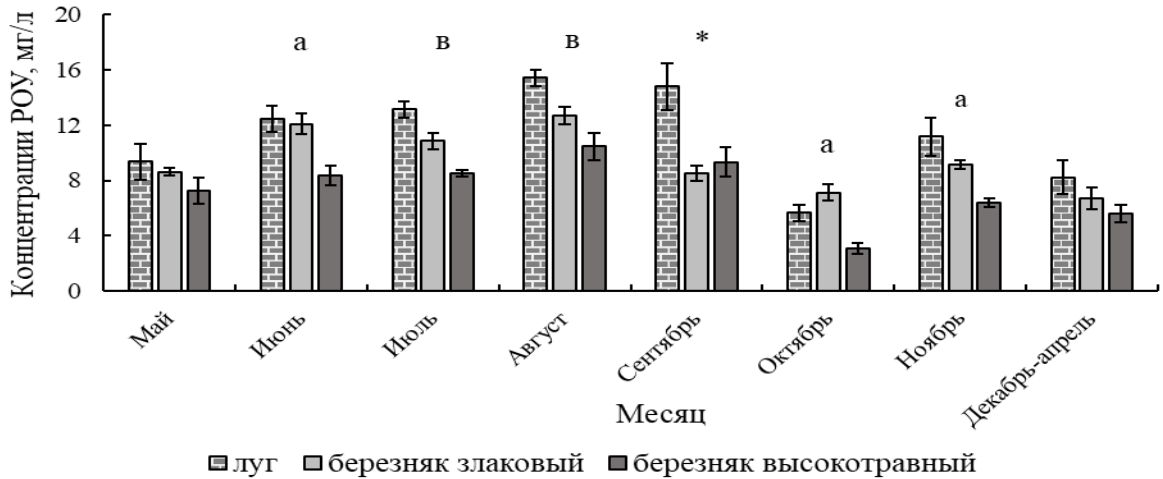


Рисунок 6.6 – Сезонная динамика концентраций РОУ в лизиметрических водах на глубине 30 см.

$p < 0,05$ при сравнении между: * – лугом и березняками, а – березняком высокотравным и остальными БГЦ, б – березняком высокотравным и лугом. Планки погрешности показывают стандартную ошибку среднего.

6.4 Поток растворенного органического углерода с атмосферными выпадениями и лизиметрическими водами

Годовое поступление РОУ с атмосферными выпадениями в мелколиственных БГЦ значительно больше ($p < 0,03$), чем на лугу: в 2,9 раза в березняке злаковом и в 3,1 раза в березняке высокотравном (рисунок 6.7) (Гичан и др., 2025). Миграция РОУ с почвенными водами с глубины 10 см и 30 см имеет закономерность обратную поступлению: для глубины 10 см миграция в лугах в 1,3 – 2,2 раза больше, чем для мелколиственных БГЦ, для глубины 30 см в 1,9 – 2,5 раза. Миграция РОУ из 10-см слоя в березняке высокотравном в 1,7 раз больше, чем в березняке злаковом.

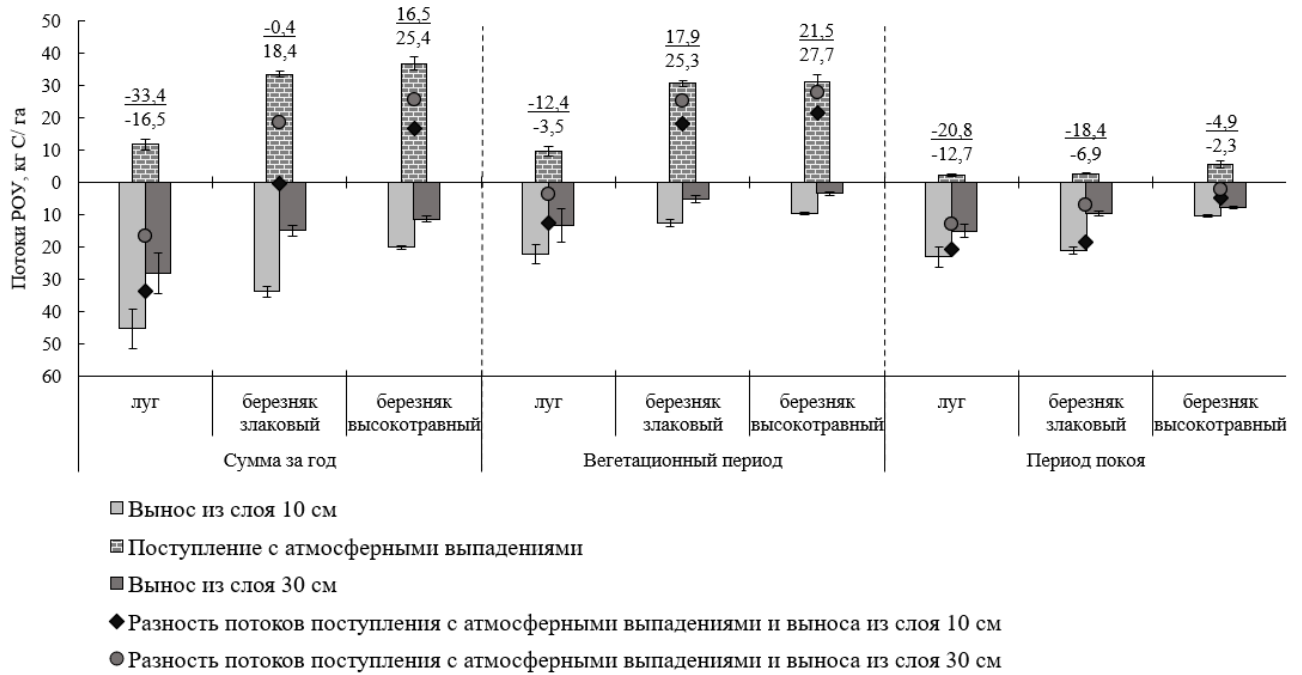


Рисунок 6.7 – Потоки РОУ.

Цифры в графиках показывают разность потоков поступления с атмосферными выпадениями и выноса с лизиметрическими водами из слоя 10 см (числитель) и 30 см (знаменатель). Оценки потоков за вегетационный период (май – октябрь) и период покоя (ноябрь – апрель), представлены в виде суммы потоков за 6 мес. Планки погрешности показывают стандартную ошибку среднего.

Различия между исследуемыми БГЦ в поступлении РОУ с атмосферными выпадениями в вегетационный период идентичны годовым закономерностям: поток РОУ в лесных БГЦ в 3,2 раза больше по сравнению с лугом. В период покоя поступление РОУ с атмосферными выпадениями не различалось в исследуемых типах БГЦ и в среднем составляет 3,5 кг С/га. Поступление в вегетационный период значительно выше по сравнению с периодом покоя для БГЦ всех типов: в мелколиственных БГЦ на 26,7 кг С/га, для луга – на 7,4 кг С/га.

В вегетационный период миграция РОУ с лизиметрическими водами (10 см) на лугу в 2 раза больше, чем в мелколиственных БГЦ. В период покоя отмечается меньший вынос в березняке высокотравном по сравнению с березняком злаковым и лугом, на 12,7 и 10,7 кг С/га соответственно. При сравнении выноса в вегетационный период и период покоя значимые различия выявлены только для березняка злакового: в вегетационный период вынос РОУ в 1,8 раз больше по

сравнению с периодом покоя. Для березняка высокотравного и луга различия по выносу РОУ в вегетационный период и период покоя не превышали 1,0 кг С/га.

Миграция РОУ с почвенными водами с глубины 30 см за вегетационный период значимо не различается между исследуемыми БГЦ, однако, прослеживается тренд на увеличение выноса в ряду березняк высокотравный < березняк злаковый < луг от 3,5 до 13,2 кг С/га. В период покоя миграция РОУ на лугах в 1,4 раза больше по сравнению с мелколиственными БГЦ. Для лесных БГЦ миграция РОУ с глубины 30 см в вегетационный период в 1,8 – 2,2 раза больше по сравнению с периодом покоя, в то время как для луга различия не выявлены.

Разница между поступлением РОУ с атмосферными выпадениями и выносом из слоя 10 см характеризуется закреплением РОУ в почвах мелколиственных БГЦ (16,6 кг С/(га год)) и вымывание почвенного углерода в луговом БГЦ (-33,5 кг С/(га год)), для березняка злакового потоки РОУ с атмосферными выпадениями и почвенными водами практически идентичны (-0,3 кг С/(га год)) (рисунок 6.7). В мелколиственных БГЦ поступление РОУ с атмосферными выпадениями преобладает над выносом с глубины 30 см, аккумуляция РОУ в почвах в среднем составляет 21,9 кг С/(га год). При этом аккумуляция РОУ в почвах березняка высокотравного в 1,4 раз больше, чем в почвах березняка злакового. В свою очередь, в луговом БГЦ вынос РОУ с лизимитрическими водами на глубине 30 см преобладает над поступлением с атмосферными выпадениями, вымывание РОУ составляет 16,5 кг С/(га год).

За вегетационный период в мелколиственных БГЦ из РОУ аккумулируется 19,8 кг С/га в слое 0 – 10 см и 26,5 кг С/га в слое 0 – 30 см. На лугу из 10-см почвенного слоя вымывается 14,4 кг С/га. В 30-см толще почв луга с потоком РОУ вымывается 3,5 кг С/га. В период покоя для всех вариантов исследования наблюдается вымывание РОУ, которое увеличивается в ряду березняк высокотравный < березняк злаковый < луг от -4,9 до -20,8 кг С/га для минерального слоя почв 0 – 10 см и от -2,3 до -12,7 кг С/га для слоя 0 – 30 см.

6.5 Сезонная динамика потоков РОУ

Для мелколиственных биогеоценозов максимальное поступление РОУ с атмосферными выпадениями наблюдается в мае от 7,9 до 8,8 кг С/(га мес.) (рисунок 6.8). Также для данных БГЦ отмечено высокое поступление РОУ в июне и августе 6,7 и 6,2 кг С/(га мес.) соответственно. Луговой БГЦ характеризуется равномерным поступлением РОУ с июля по август 1,7 – 2,5 кг С/(га мес.). Минимальное поступление РОУ для всех БГЦ наблюдается в период с декабря по апрель, в среднем – 0,2 кг С/(га мес.). В мае, июне, сентябре и октябре наблюдается больше поступление РОУ в мелколиственных БГЦ по сравнению с лугом: в 2,8 – 6,9 раз, максимальные различия наблюдаются в сентябре, минимальные в октябре. В июле поступление РОУ в березняке злаковом на 25 % больше по сравнению с лугом. В ноябре отмечено большее (в среднем на 2,5 кг С/(га мес.)) поступление РОУ в березняке высокотравном по сравнению с остальными БГЦ. Влияние древесного полога на потоки растворенных органических веществ с атмосферными выпадениями объясняется, во-первых, изменением концентрации растворенных органических веществ при прохождении сквозь кроны деревьев, а во-вторых, регулированием объемов поступающих атмосферных выпадений при их перехвате пологом леса (Султанбаева и др., 2015; Кузнецова и др., 2022; Гичан и др., 2023).

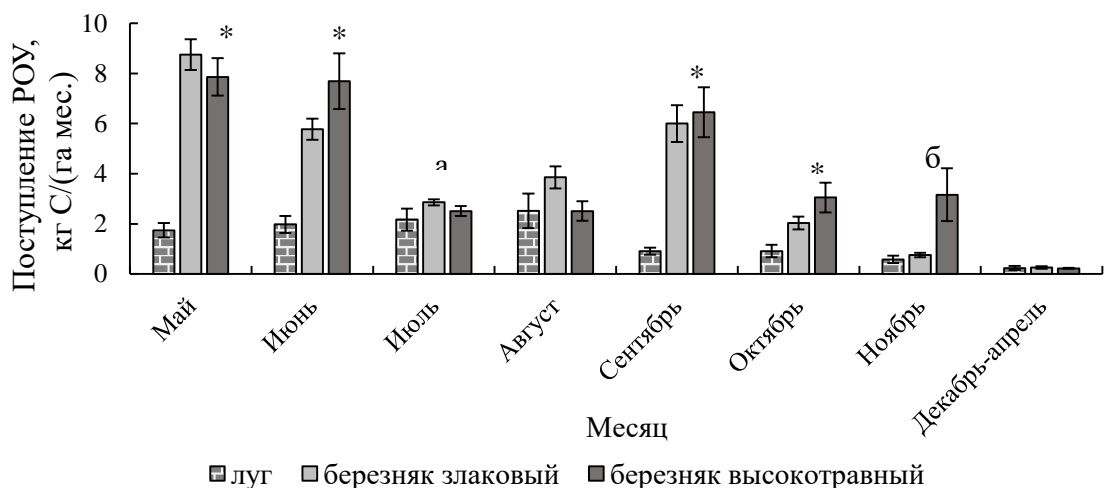


Рисунок 6.8 – Сезонная динамика поступления РОУ с атмосферными выпадениями. $p < 0,05$ при сравнении между: * – лугом и березняками, а – березняком злаковым и лугом, б – березняком высокотравным и остальными БГЦ. Планки погрешности показывают стандартную ошибку среднего.

Миграция РОУ из десяти- и тридцатисантиметровой глубины имеет схожие закономерности (рисунок 6.9, 6.10). Наименьший вынос РОУ для всех БГЦ наблюдается в октябре: для 10 см слоя – от 0,02 до 0,09 кг С/(га/мес.), для 30 см слоя – в среднем 0,01 кг С/(га мес.). Для луга максимальный вынос РОУ приходится на ноябрь – 9,7 и 7,2 кг С/(га мес.) для глубины 10 см и 30 см соответственно. В мелколиственных БГЦ для 10 см слоя почв максимальный вынос РОУ приходится на август 3,4 – 5,8 кг С/(га/мес.), для 30 см слоя почв – на ноябрь 2,3 – 3,5 кг С/(га мес.). В июне и июле миграция РОУ на лугу больше по сравнению с мелколиственными БГЦ – в 3,4 раза для 10 см слоя почвы и в 6,7 раз для 30 см слоя. В ноябре вынос РОУ различался между каждым из исследуемых БГЦ уменьшаясь в ряду луг > березняк злаковый > березняк высокотравный от 9,7 до 1,7 кг С/(га мес.) для слоя 10 см и от 7,2 до 2,3 кг С/(га мес.) для слоя 30 см. В октябре отмечен более низкий вынос РОУ для березняка высокотравного по сравнению с остальными БГЦ – в 3,4 раза для слоя 10 см и в 2,3 раза для слоя 30 см. Миграция РОУ из слоя 10 см в период с декабря по апрель в березняке злаковом в 2 раза больше по сравнению с березняком высокотравным. Для слоя 30 см миграция РОУ в сентябре различается для березовых и лугового БГЦ, для первых вынос на 139,0 кг С (га/мес.) меньше. Низкий вынос РОУ для лесных БГЦ с одной стороны объясняется влиянием корневых систем, которые в период вегетации активно поглощают влагу из почвы (Špulák et al., 2021), с другой – качеством подстилки и деятельностью почвенной фауны, которые обуславливают более высокую концентрацию РОУ в луговых лизиметрических водах (Ilstedt et al., 2007, Evans et al., 2020).

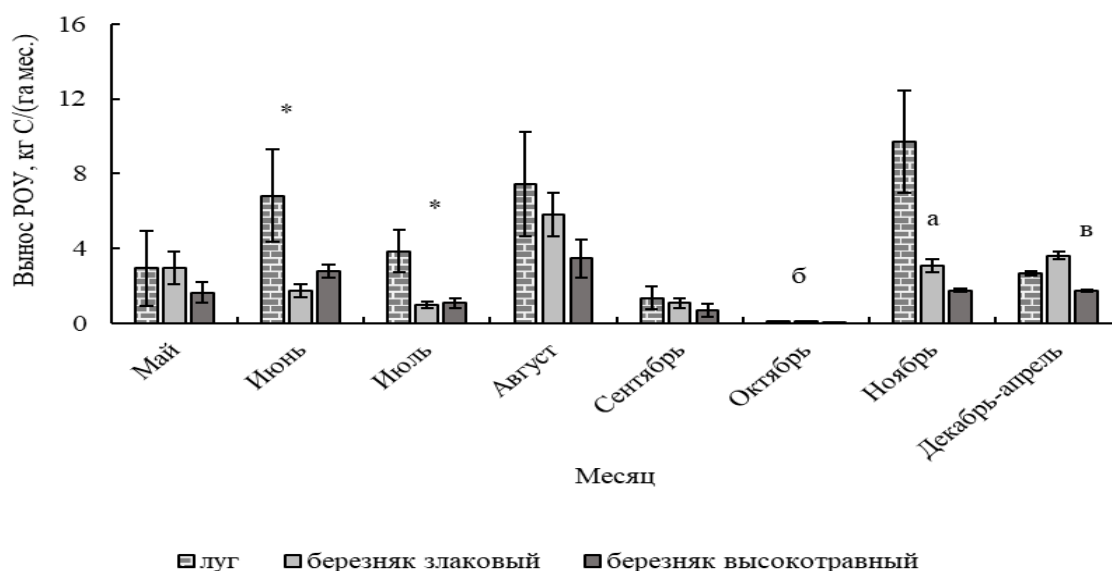


Рисунок 6.9 – Сезонная динамика выноса РОУ с лизиметрическими водами с глубины 10 см. $p < 0,05$ при сравнении между: * – лугом и березняками, а – каждым из БГЦ, б – березняком высокотравным и остальными БГЦ, в – березняками. Планки погрешности показывают стандартную ошибку среднего.

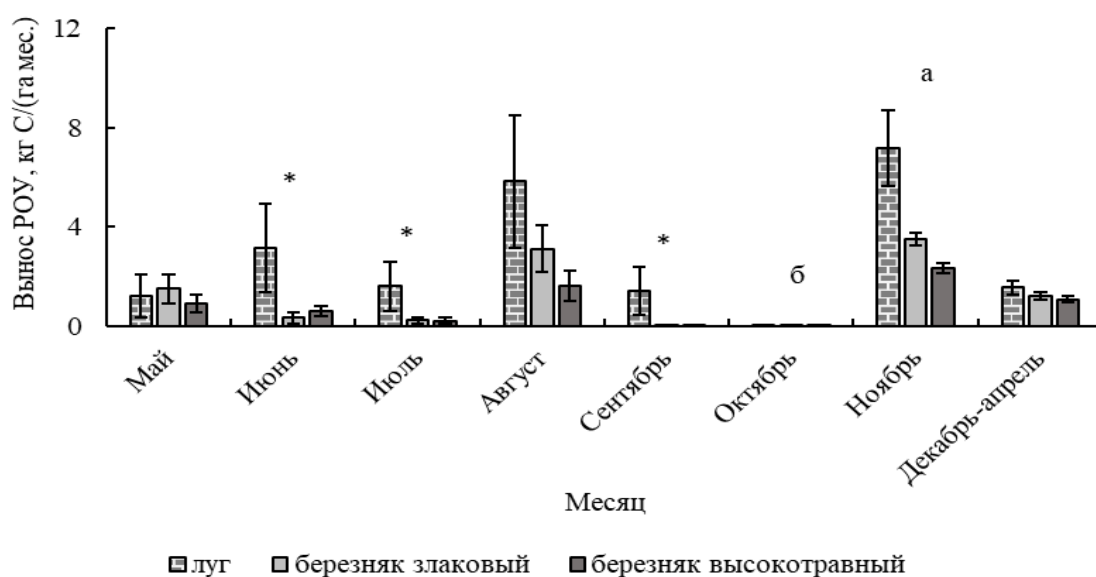


Рисунок 6.10 – Сезонная динамика выноса РОУ с лизиметрическими водами с глубины 30 см. $p < 0,05$ при сравнении между: * – лугом и березняками, а – каждым из БГЦ, б – березняком высокотравным и остальными БГЦ. Планки погрешности показывают стандартную ошибку среднего.

Выводы к главе 6

1. Древесная растительность оказывает значительное влияние на концентрации и потоки РОУ с атмосферными выпадениями. При прохождении осадков сквозь лесной полог концентрация РОУ увеличивается в 4 раза. За счет

этого поток РОУ с атмосферными выпадениями в мелколиственных БГЦ в 3 раза выше, чем на лугу разнотравном. Различия между типами растительных сообществ объясняются разницей потоков РОУ в мае – июле и в сентябре – октябре.

2. Мелколиственные БГЦ отличаются меньшим выносом РОУ по сравнению с лугом: из десятисантиметровой толщи почвы вынос РОУ в 1,7 раз ниже, из тридцатисантиметровой в 2,2 раза. Низкие показатели выноса РОУ для лесных экосистем связаны как с объемами воды, так и с пониженной концентрацией РОУ в ней.

3. Таким образом мелколиственные БГЦ характеризуются более эффективным удерживанием растворенного органического углерода в горизонте подстилки и старопашотной минеральной толще почвы, по сравнению с луговым типом БГЦ. В березняках поступление РОУ с атмосферными выпадениями преобладает над его выносом с почвенными водами из слоя 0 – 30 см средним на 22,0 кг С/(га год), в то время как из луговых экосистем с вертикальным стоком РОУ в иллювиальный горизонт почвы выносятся 17 кг С/(га год).

ГЛАВА 7. ИНФОРМАТИВНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ВЛИЯНИЯ РАСТИТЕЛЬНОСТИ НА ЗАПАСЫ ПОЧВЕННОГО УГЛЕРОДА

Тип растительности является одним из основных факторов почвообразования, обуславливая процессы формирования и трансформации ПОУ. Однако, для исследуемых БГЦ количественные показатели типа растительности, такие как запасы фитомассы и видовое богатство характеризуются слабой связью с вариацией запасов ПОУ в горизонте подстилке и минеральных слоях ($r = 0,09 - 0,2$). Поэтому мы предполагаем, что влияние растительности на запасы ПОУ осуществляется через регулирование экосистемных потоков поступления углерода с опадом и атмосферными выпадениями и его миграцией с почвенными водами, а также в результате регулирования процессов разложения, которые возможно оценить на основе данных об эмиссии CO_2 .

7.1 Поступление углерода с растительным опадом и его качественные характеристики

Тип растительных сообществ определяет количественные и качественные характеристики (отношение C/N , концентрация N) растительного опада. Установлена отрицательная корреляция между запасами ПОУ в подстилке постагрогенных БГЦ и концентрацией N в растительном опаде ($r = -0,68$), однако, с отношением C/N корреляция положительная ($r = 0,51$). Отношение C/N и содержание азота в опаде напочвенного покрова также связаны с вариацией запасов углерода подстилки, при этом связь данных показателей в среднем в 1,7 – 2,3 раза ниже, чем с качественными характеристиками всего растительного опада. В растительных образцах отношение C/N в большей степени зависит от концентрации азота, поскольку содержание углерода характеризуется низкой вариабельностью – 11 %. Поэтому содержание азота в растительном опаде может считаться более информативным показателем по сравнению с отношением C/N . Чем уже отношение C/N и выше концентрация N в опаде, т.е. чем выше качество опада, тем быстрее происходит его разложение, что не способствует накоплению

углерода в подстилке (Карпачевский и др., 1980; Иванова и др., 2023). Поэтому запас углерода в подстилке мелколиственных БГЦ, несмотря на меньшее поступление опада, выше, чем в луговом БГЦ за счет наличия трудноразлагаемой фракции – веток ивы и березы.

Таблица 7.1 – Значимые коэффициенты корреляции ($p < 0,05$) (в числителе) и коэффициенты детерминации (в знаменателе) между информативными показателями и запасами ПОУ.

Информативные показатели		Горизонт				
		О	Старопахотный горизонт, см			
			в том числе			0-30
			0-5	5-15	15-30	
1	2	3	4	5	6	
Поступление углерода с растительным опадом и его качественные характеристики						
1	Концентрация азота в растительном опаде	$\frac{-0,68}{0,46}$	$\frac{0,35}{0,12}$	-	-	-
2	Отношение C/N в растительном опаде	$\frac{0,51}{0,25}$	-	-	-	-
3	Поступление углерода с растительным опадом	-	-	$\frac{0,53}{0,28}$	$\frac{0,67}{0,44}$	$\frac{0,55}{0,30}$
4	Концентрация азота в опаде напочвенного покрова	$\frac{-0,32}{0,10}$	-	-	-	-
5	Отношение C/N в опаде напочвенного покрова	$\frac{0,28}{0,08}$	-	-	-	-
6	Поступление углерода с опадом напочвенного покрова	-	-	$\frac{0,41}{0,17}$	$\frac{0,57}{0,33}$	$\frac{0,49}{0,24}$
Поступление РОУ с атмосферными выпадениями						
1	Поступление РОУ за вегетационный период	$\frac{0,51}{0,26}$	-	-	$\frac{-0,45}{0,20}$	$\frac{-0,41}{0,17}$
2	Среднемесячная концентрация РОУ за вегетационный период	$\frac{0,33}{0,11}$	-	-	-	-
3	Поступление РОУ в мае	$\frac{0,68}{0,46}$	$\frac{-0,43}{0,18}$	$\frac{-0,57}{0,33}$	$\frac{-0,59}{0,35}$	$\frac{-0,61}{0,38}$
4	Концентрация РОУ в мае	$\frac{0,67}{0,44}$	$\frac{-0,37}{0,13}$	$\frac{-0,50}{0,25}$	$\frac{-0,54}{0,29}$	$\frac{-0,55}{0,30}$
5	Объемы поступления водах в мае	$\frac{0,45}{0,20}$	-	-	-	-
6	Поступление РОУ в июле	-	$\frac{-0,43}{0,18}$	-	-	-
7	Концентрация РОУ в июле	-	$\frac{-0,49}{0,24}$	-	-	-

Продолжение таблицы 7.1

1	2	3	4	5	6	7
Эмиссия CO₂ из почв						
1	Эмиссия в августе	-	<u>0,49</u> 0,24	-	-	
2	Эмиссия в сентябре	<u>-0,59</u> 0,34	-	<u>0,51</u> <u>0,26</u>	<u>0,63</u> 0,39	<u>0,32</u> 0,10
3	Эмиссия в октябре	<u>-0,76</u> 0,45	-	<u>0,57</u> 0,32	<u>0,69</u> 0,47	<u>0,68</u> 0,46
Вынос РОУ с лизимитрическими водами с глубины 30 см						
1	Вынос РОУ в сентябре	<u>-0,43</u> 0,18				
2	Концентрация РОУ в сентябре	<u>-0,56</u> 0,31				

Примечание. Коэффициенты корреляции приведены только для информативных показателей обуславливающих различия запасов ПОУ между исследуемыми БГЦ

Установлена положительная связь между запасами углерода в старопашотной толще и поступлением углерода с растительным опадом ($r = 0,55$), в том числе с опадом напочвенного покрова ($r = 0,49$). Важно отметить, что данные переменные являются коллинеарными, так как общее поступление углерода с растительным опадом в значительной степени обусловлено поступлением опада напочвенного покрова. Углерод опада, разлагаясь в подстилке, мигрирует в нижележащие горизонты, связываясь с ППК (Телеснина и др., 2017; Кузнецова и др., 2021; Лукина и др., 2021). Большая часть активной фракции опада в изучаемых типах БГЦ высокого качества, что объясняет высокую скорость разложения опада и миграцию органического вещества в минеральный слой почвы 0 – 30 см. Поэтому чем больше количество легкоразлагаемого опада, тем больше пул углерода в минеральном слое почв. На лугу формируется более качественный опад в большем количестве, что ускоряет миграцию углерода в слой 5 – 30 см по сравнению с мелколиственными БГЦ.

Анализ связи между качественными и количественными характеристиками опада и вариацией запасов углерода отдельных слоёв старопашотной толщи позволил выявить следующие закономерности. Выявлена отрицательная корреляция между запасами углерода в слое 0 – 5 см и концентрацией N в растительном опаде ($r = -0,35$). Слой 0-5 см непосредственно контактирует с подстилкой, поэтому влияние качества опада на этот слой более выражено, чем в

н

и

Установлены связи между запасами ПОУ в слое 5 – 30 см и количественными показателями растительного опада, а именно, поступлением углерода с растительным опадом в целом и опадом напочвенного покрова, в частности, коэффициенты корреляции варьируют от 0,53 до 0,67. На лугу формируется более качественный опад в большем количестве, что способствует ускорению миграции соединений углерода в слой 5 – 30 см по сравнению с березняками. Это объясняет различия в запасах углерода в слое 5 – 30 см между лугом и мелколиственными БГЦ.

7.2 Поступление РОУ с атмосферными выпадениями

В мелколиственных БГЦ за счёт прохождения атмосферных выпадений сквозь кроны древостоя поступление РОУ больше, чем в луговом БГЦ. Выявлена положительная корреляция между поступлением РОУ с атмосферными выпадениями за вегетационный период и запасами углерода в подстилке ($r = 0,51$) (таблица 7.1). Данная связь обусловлена концентрацией РОУ в атмосферных выпадениях. Поступление РОУ в мае, как составная часть потока за вегетационный период, также является информативным показателем различий запасов углерода подстилки между исследуемыми БГЦ, при этом коэффициент корреляции для поступления РОУ в мае на 0,17 сильнее по сравнению с коэффициентом корреляции для поступления РОУ за вегетационный период (таблица 7.1). Связи между поступлением РОУ с атмосферными выпадениями и запасами углерода в подстилке могут быть обусловлены замедлением процесса биodeградации из-за

а

л Для старопахотной толщи (0 – 30 см), как и для горизонта О информативными показателями вариации запасов углерода выступают поступление РОУ за вегетационный период ($R^2 = 0,17$, $p < 0,05$), в частности в мае ($R^2 = 0,38$, $p < 0,01$). Корреляция составляет -0,41 и -0,61 соответственно. По-видимому, большее поступление углерода с атмосферными выпадениями может

в

з

способствовать замедлению разложения подстилки и меньшему выщелачиванию РОУ, поэтому миграция углерода в минеральные слои снижается.

Результаты анализа связи между поступлением РОУ и запасами углерода в отдельных слоях старопахотной толщи позволили установить следующие информативные показатели: для слоя 0 – 5 см поступление РОУ в июле и мае (для обоих показателей $r = -0,43$), для слоёв 5 – 15 и 15 – 30 см поступление РОУ в мае ($r = -0,58$), что согласуется с закономерностями, полученными для старопахотной толщи.

7.3 Эмиссия CO_2 из почв

Информативными показателями различий запасов углерода подстилки ($p < 0,04$, $R^2 = 0,24 - 0,47$) являются потоки эмиссии CO_2 в период с августа по октябрь (таблица 7.1). Для горизонта подстилки почвенное дыхание в октябре отрицательно связано с различиями в запасах ПОУ между исследуемыми БГЦ, $r = -0,76$, слабее в сентябре – $r = -0,59$. Чем ниже почвенное дыхание и, следовательно, активность деструкции подстилки, тем больший запас углерода в ней. Меньшая деструкция означает снижение эмиссии углерода в атмосферу и миграции углерода в минеральные слои почвы. Менее активная деструкция опада в мелколиственных БГЦ по сравнению с луговым связана с опадом более низкого качества, который медленней разлагается гетеротрофными организмами.

Для старопахотной толщи (0 – 30 см), корреляция между почвенным дыханием в сентябре - октябре и запасами углерода составляет 0,32 для сентябрьских потоков CO_2 и 0,68 – для октябрьских. Эмиссия углерода свидетельствует о мобильности органических соединений углерода. Чем выше эмиссия, тем быстрее происходит физическое и химическое разложение опада и, следовательно, миграция углерода из подстилки в старопахотный слой. При этом эмиссия из почв в августе положительно связана только с запасами ПОУ в слое 0 – 5 см ($r = 0,49$), эмиссия в сентябре и октябре – с запасами в слое 5 – 30 см ($r = 0,51 - 0,69$).

Таким образом, активность почвенных микроорганизмов и связанные с ней процессы разложения, выраженные через потоки эмиссии CO_2 , в осенние месяцы (главным образом в октябре) влияют на запасы ПОУ. Полученные закономерности согласуются с различиями в потоках CO_2 между исследуемыми БГЦ (см. главу 5.1). Данные месяцы характеризуются максимальным поступлением свежего опада, различия в качественных и количественных характеристиках которого обуславливают разную скорость его деструкции, что выражается через интенсивность почвенного дыхания.

7.4 Вынос РОУ с лизимитрическими водами

Миграция РОУ с лизимитрическими водами в иллювиальный горизонт почвы в сентябре является информативным показателем различий запасов углерода подстилки в исследуемых БГЦ. Между переменными наблюдается отрицательная корреляция ($r = -0,43$), что связано с концентрациями РОУ, а не объемом лизимитрических вод. Механизм данной связи может быть обусловлен качеством опада и процессами вымывания РОУ при разложении подстилки. Пик поступления опада приходится на сентябрь. Для лугового БГЦ горизонт подстилки сформирован опадом высокого качества с быстрым оборотом, как следствие, запасы углерода подстилки для данного БГЦ меньше, чем в мелколиственных, а концентрации РОУ и их миграция с лизимитрическими водами соответственно больше.

Важно отметить, что выявлена положительная корреляция между запасами углерода в старопахотной толще исследуемых БГЦ и миграцией РОУ с лизимитрическими водами в отдельные месяцы вегетационного периода (июнь, июль), $r = 0,39 - 0,42$. Данная связь обусловлена запасами углерода в старопахотной толще: большие запасы углерода способствуют большей миграции РОУ в нижние горизонты, поэтому данные переменные не могут считаться информативными показателями влияния растительности.

7.5 Оценка совместного влияния информативных показателей и их вклада в

вариацию запасов ПОУ

В разделах 7.1 – 7.4 дана оценка информативности показателей влияния растительности, связанных с потоками углерода. В настоящем разделе дан анализ вклада каждого выявленного информативного показателя в различия в запасах ПОУ между исследуемыми БГЦ.

Анализ совместного вклада показателей позволил установить, что концентрация азота в растительном опаде и почвенное дыхание в октябре вносят наибольший вклад в вариацию запасов углерода подстилки, который составляет 31 % и 28 % соответственно (рисунок 7.1а); несколько меньше вклад поступления РОУ в мае – 16 %. Вклад остальных показателей составляет менее 10 %. Анализируемые информативные показатели объясняют 82 % вариации запасов ПОУ.

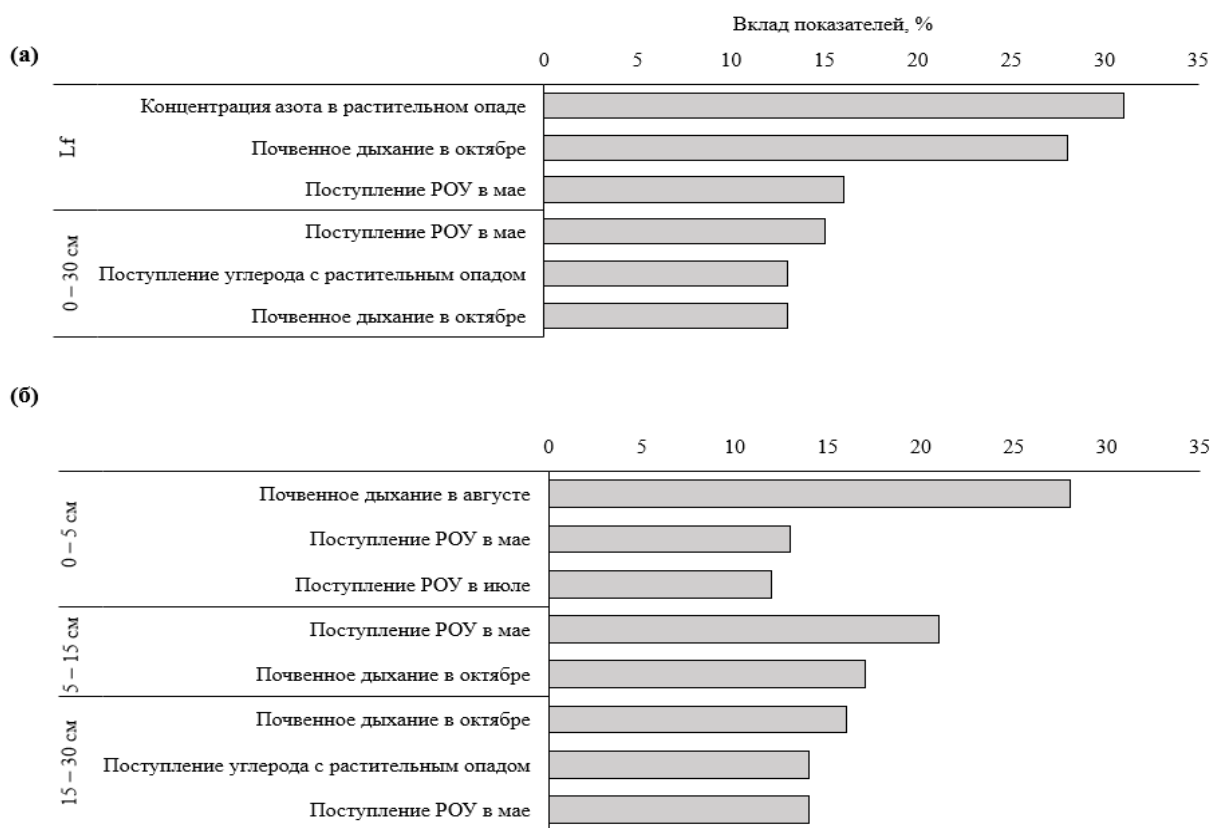


Рисунок 7.1 – Вклад информативных показателей в вариацию запасов ПОУ между исследуемыми БГЦ.

а – для подстилки и старопахотной толщи (0 – 30 см) б – для отдельных слоев старопахотной толщи: 0 – 5, 5 – 15 и 15 – 30 см. Каждый показателей является статистически значимым $p < 0,05$, $n = 25$.

Для старопахотной толщи 0 – 30 см ключевыми информативными показателями являются поступление РОУ в мае, обуславливающее 15 % вариации запасов ПОУ, поступление углерода с растительным опадом (13 %, здесь и далее – процент вариации) и дыхание почвы в октябре (13 %). Вклад остальных показателей составляет менее 5%. Представленные показатели объясняют 68 % вариации запасов ПОУ.

Наибольший вклад в вариацию запасов ПОУ в слое 0 – 5 см вносит эмиссия CO_2 в августе (28 %), а также поступление РОУ в мае и июле, вклад которых составляет 13 % и 12 % соответственно (рисунок 7.1б). Концентрация азота в растительном опаде определяет только 5 % вариации запасов ПОУ.

В слое 5 – 15 см вклад информативных показателей в различия запасов ПОУ исследуемых БГЦ ранжируется следующим образом: поступление РОУ в мае (21 %) > эмиссия CO_2 в октябре (17 %) > поступление углерода с растительным опадом (9 %) > эмиссия CO_2 в сентябре (6 %).

Для слоя 15 – 30 см наибольшую долю в вариацию запасов ПОУ между исследуемыми БГЦ вносит эмиссия CO_2 в октябре – 16 %. Вклад поступления углерода с опадом напочвенного покрова и поступление РОУ в мае составляет по 14 %. Вклад остальных показателей обуславливает менее 10 % вариации ПОУ.

Выводы к главе 7

1. Информативными показателями вариации в запасах углерода дерново-подзолистых остаточно-карбонатных почв между березняком злаковым и высокотравным, а также лугом выступают разные параметры для подстилки и старопахотной толщи:

- для подстилки – качество опада (концентрация N, отношение C/N), в том числе опада напочвенного покрова, поступление РОУ в целом за вегетационный период и в мае, почвенное дыхание в сентябре – октябре, а также вынос РОУ с лизиметрическими водами в сентябре.

- для старопахотной толщи – поступление углерода с растительным опадом, поступление РОУ в целом за вегетационный период и в мае, дыхание почвы в

сентябре – октябре. При этом качество опада (концентрация N) значимо для слоя 0 – 5 см, а его количество (поступление углерода с растительным опадом) – для слоев 5 – 30 см. Поступление РОУ в июле и мае определяет различия в запасах ПОУ в слое 0 – 5 см, но на различия в запасах углерода в слое 5 – 30 см оказывает влияние только майские потоки. Поступление РОУ в целом за вегетационный период является информативным показателем вариации запасов ПОУ в слое 15 – 30 см. Эмиссия в августе информативна только для слоя 0 – 5 см, эмиссия в сентябре и октябре – для слоя 5 – 30 см.

2. Наибольший вклад в вариацию запасов почвенного углерода в постагрогенных экосистемах на дерново-подзолистых остаточно-карбонатных почвах вносят специфические процессы для каждого горизонта:

- в подстилке – концентрация азота в растительном опаде (31 % вариации), почвенное дыхание в октябре – 28 % и поступление РОУ в мае – 16 %.

- в старопашотной толще – поступление РОУ в мае (15 % вариации), поступление углерода с растительным опадом – 13 % и дыхание почвы в октябре 13 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование вносит принципиальное уточнение в понимание механизмов влияния лесной и луговой растительности на формирование запасов углерода в дерново-подзолистых остаточно-карбонатных почвах постагрогенных экосистем. Полученные результаты демонстрируют дивергенцию двух альтернативных типов постагрогенных экосистем — лугового и мелколиственного леса — по ключевым пулам и потокам углерода.

Экосистемные запасы углерода в лесных БГЦ в 2 раза выше, чем на лугу за счет формирования древесной фитомассы. Различия в запасах углерода дерново-подзолистых остаточно-карбонатных почв между лесными и луговыми БГЦ определяются потоками углерода, обусловленных влиянием растительности: в мелколиственных БГЦ запасы углерода подстилки на 30 % больше, чем на лугу, при этом в старопашатной толще запас углерода на лугу на 12 – 23 % больше по сравнению с лесными БГЦ.

Ключевой механизм-регулятор — продуцирование опада определенного качества и количества. Луговое разнотравье продуцирует больше опада и более высокого качества (с низким отношением C/N, определяемым содержанием азота) чем мелколиственные БГЦ, который быстро разлагается, обеспечивая высокий поток углерода в минеральную толщу, но не формирует больших запасов подстилки. Напротив, в березняках значительная доля древесного опада (10 – 25%) представлена трудноразлагаемыми фракциями. Содержание азота в растительном опаде определяет 31% вариации запаса углерода подстилки, а количество углерода, поступающего с опадом – 13% вариации запаса углерода старопашотной толщи изучаемых постагрогенных БГЦ.

Почвенное дыхание, как показатель, связанный с активностью гетеротрофов, отражает процессы разложения органического вещества почв, которые в свою очередь зависят от качественных и количественных характеристик опада. Меньшее количество опада, часть из которого – трудноразлагаемая, определяет более низкую осеннюю эмиссию CO₂ из почвы (в 1,3–1,8 раза) в мелколиственных БГЦ

по сравнению с лугом. Вклад почвенного дыхания в вариацию запасов углерода составляет 28% и 13% для подстилки и старопахотного минерального слоя почв соответственно.

Отдельный значимый механизм влияния растительности – регулирование потоков РОУ с атмосферными выпадениями и почвенными водами. При прохождении осадков сквозь лесной полог поток РОУ с атмосферные выпадения увеличивается втрое. Вынос РОУ с лизиметрическими водами в иллювиальный горизонт почвы в лесных БГЦ в 3,4 раза ниже по сравнению с лугом. Следовательно, лесные БГЦ выступают как «ловушки» для РОУ, в лесных БГЦ происходит удержание РОУ (22 кг С/ (га год)), в то время как из луговых экосистем с вертикальным стоком РОУ мигрирует 17 кг С/(га год). Это указывает на сорбционное или биогенное закрепление поступившего РОУ в лесных почвах. Поступление РОУ с атмосферными выпадениями объясняет 16% и 15% вариации запаса углерода подстилки старопахотной толщи соответственно.

Выявлена временная специфика влияния лесной и луговой растительности на запасы почвенного углерода. В мае, в период распускания листвы и цветения березы, начинают работать механизмы вымывания РОУ с поверхности органов растений (поступления РОУ в мае коррелирует с запасами углерода по всему профилю 0-30 см). Сентябрь-октябрь характеризуется максимальным поступлением опада разного количества и качества в луговых и лесных БГЦ, что влияет на почвенное дыхание и вынос РОУ с лизиметрическими водами, т.к. в этот период происходит начальный этап его разложения. Поток углерода с опадом, с лизиметрическими водам и почвенное дыхание в данные месяцы наиболее контрастно дифференцируют луговой и лесной типы БГЦ.

Полученные результаты имеют прямое значение для природно-климатической деятельности и обоснования углеродно-нейтрального природопользования на постагрогенных землях. Они могут быть использованы для прогноза углероддепонирующего потенциала таких экосистем, т.к. создают основу для калибровки и верификации математических моделей. Для максимизации долговременного депонирования углерода с использованием положительных

эффектов лесной растительности, на изучаемых почвах следует реализовывать следующие стратегии, основанные на выявленных в работе механизмах:

1. Использование способности лесных экосистем накапливать углерод в подстилке, за счет формирования опада определенного количества и качества. Подстилка выступает как буферный пул, углерод которого со временем может мигрировать в минеральную толщу почвы.

2. Использование способности леса к удержанию РОУ. Лесные БГЦ удерживают РОУ, в то время как на лугу происходит его миграция в нижние горизонты почвы и последующий вынос из экосистемы с грунтовыми водами. Управленчески данный механизм поддерживается сохранением древесного полога, который увеличивает поступление РОУ с атмосферными выпадениями, создавая дополнительный поток в систему.

3. Использование данных о сезонной динамике потоков для усиления положительного эффекта. Для мелколиственных БГЦ южной тайги рекомендуется не проводить лесохозяйственные мероприятия в начале (май) и в конце (сентябрь – октябрь) вегетационного периода. В данные месяцы влияние рубок и разреживаний в древостоях на потоки углерода и процессы формирования пула почвенного углерода будет наиболее выражено.

4. Комбинирование лесной и луговой «стратегий» в пространственной мозаике. Признавая, что луга превосходят березовый лес по запасам углерода в минеральной толще (0–30 см), но при этом пул углерода фитомассы лесов выше, чем на лугах, предлагается комбинированное ведение землепользования, где лесные территории могли бы обеспечить депонирование углерода в фитомассе и подстилке, а луговые – в почве.

Таким образом, оптимальная климатическая стратегия – не противопоставление леса и луга, а функциональное зонирование территории, где лесные участки решают задачи, для которых они объективно эффективнее луговых биогеоценозов.

Таким образом, диссертационная работа не только раскрывает фундаментальные механизмы углеродного цикла в постагрогенных экосистемах,

но и способствует формированию доказательной базы для климатически ориентированного землепользования.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аверина, М.В. Вторичные сукцессии на землях из-под сельскохозяйственного пользования на территории Кенозерского национального парка / М.В. Аверина, П.А. Феклистов, С.В. Третьяков, О.Д. Кононов // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. — 2016. — № 5. — С. 25–32.
2. Аржанова, В.С. Геохимия, функционирование и динамика горных геосистем Сихотэ-Алиня (юг Дальнего Востока России) / В.С. Аржанова, П.В. Елпатьевский. — Владивосток: Дальнаука, 2005. — 253 с.
3. Архив погоды в Череповце (аэропорт). METAR. — URL: [https://gp5.ru/Архив_погоды_в_Череповце_\(аэропорт\),_METAR](https://gp5.ru/Архив_погоды_в_Череповце_(аэропорт),_METAR) (дата обращения: 28.01.2025).
4. Баева, Ю.И. Изменение агрегатного состава различных типов почв в ходе залежной сукцессии / Ю.И. Баева, И.Н. Курганова, Л.А. Овсепян, В.М. Телеснина, Ю.Д. Цветкова // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. — 2017. — № 88. — С. 47–74.
5. Баженова, О.В. Пространственно-временной анализ лесопользования в Вологодской области / О.В. Баженова, О.А. Золотова, Е.А. Иванищева, А.Ф. Осолодкина // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. — 2024. — Т. 32. — № 2. — С. 213–226.
6. Базилевич, Н.И. Методы изучения биологического круговорота в различных природных зонах / Н.И. Базилевич, А.А. Титлянова, В.В. Смирнов, Л.Е. Родин, Н.Т. Нечаева, Ф.И. Левин. — М.: Мысль, 1978. — 185 с.
7. Базилевич, Н.И. Биотический круговорот на пяти континентах: азот и зольные элементы в наземных экосистемах / Н.И. Базилевич, А.А. Титлянова. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008.
8. Барталев, С.А. Применение методов дистанционного зондирования из космоса для мониторинга бюджета углерода в наземных экосистемах России //

Всероссийский фестиваль Наука 0+. г. Москва, 7 октября 2023 г. (устное сообщение).

9. Басова, Е.В. Качество древесного опада как информативный индикатор функциональной классификации лесов / Е.В. Басова, Н.В. Лукина, А.И. Кузнецова, А.В. Горнов, Н.Е. Шевченко, Е.В. Тихонова, Д.Л. Луговая // Вопросы лесной науки. — 2022. — Т. 5. — № 3. — С. 1–21.
10. Бобков, М.В. Расселение лесных растений из дубрав на заброшенные пашни (на примере территории заповедника «Калужские засеки») / М.В. Бобков, С.В. Москаленко // Проблемы изучения и восстановления лесостепной зоны: историко-культурные и природные территории. Сб. науч. статей. — 2013. — № 3. — С. 67–71.
11. Бобкова, К.С. Запасы крупных древесных остатков в ельниках средней тайги европейского Северо-Востока / К.С. Бобкова, М.А. Кузнецов, А.Ф. Осипов // Изв. вузов. Лесн. журн. — 2015. — № 2. — С. 9–20.
12. Бобкова, К.С. Бюджет углерода в экосистемах среднетаёжных коренных ельников / К.С. Бобкова, М.А. Кузнецов // Журнал общей биологии. — 2022. — Т. 83. — № 6. — С. 434–449.
13. Богатырёв, Л.Г. Основные концепции, законы и принципы современного почвоведения как основа методологии преподавания почвоведения и экологии / Л.Г. Богатырёв, Е.А. Погожева, А.И. Бенедиктова // Экология России: на пути к инновациям. — 2014. — № 10. — С. 47–52.
14. Болдескул, А.Г. Роль древесных видов в процессах функционирования ландшафтов чернопихтово-широколиственных лесов Южного Приморья / А.Г. Болдескул, Е.П. Кудрявцева, В.С. Аржанова // Сибирский экологический журнал. — 2015. — Т. 22. — № 3. — С. 355–362.
15. Брянин, С.В. Опад фитомассы в постпирогенных лиственничниках Зейского заповедника (верхнее Приамурье) / С.В. Брянин, Е.Р. Абрамова // Сибирский лесной журнал. — 2017. — № 2. — С. 93–101.

- 16.Ведрова, Э.Ф. Биогенные потоки углерода в бореальных лесах Центральной Сибири // Известия Российской академии наук. Серия биологическая. — 2011. — № 1. — С. 77–89.
- 17.Ведрова, Э.Ф. Масса подстилки и интенсивность ее разложения в 40-летних культурах основных лесобразующих пород Сибири / Э.Ф. Ведрова, Т.В. Решетникова // Лесоведение. — 2014. — № 1. — С. 42–50.
- 18.Владыченский, А.С. Некоторые показатели биологического круговорота в модельных растительных сообществах почвенных лизиметров / А.С. Владыченский, Т.Ю. Ульянова, Г.В. Золотарев // Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение. — 2000. — № 3. — С. 20–28.
- 19.Владыченский, А.С. Органическое вещество и биологическая активность постагрогенных почв южной тайги на примере Костромской области / А.С. Владыченский, В.М. Телеснина, К.А. Румянцева, Т.А. Чалая // Почвоведение. — 2013. — № 5. — С. 518–529.
- 20.Воробьев, Г.А. Очерки природы Череповецкого района / Г.А. Воробьев, В.К. Гаркуша, Д.Ф. Семенов, В.П. Уханов, Н.Н. Шевелев, Л.Г. Шестакова // Череповец: краеведческий альманах. Вып. 2. — Вологда: Легия, 1999. — С. 435–480.
- 21.Воробьева, Г.А. Природа Вологодской области / Г.А. Воробьева, Ю.Н. Белова, Н.Л. Болотова, М.Я. Борисов, А.Л. Буслович, Г.А. Воробьев, Н.А. Дружинин; под ред. Вологда: Вологжанин, 2007. — 434 с.
- 22.Гашкина, Н.А. Биогеохимическая миграция элементов в системе атмосферные осадки–кроновые 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. — № 7. — С. 693–710.
- 23.Гичан, Д.В. Заращение земель сельскохозяйственного назначения древесной растительностью: масштабы, причины, пути использования. Обзор / Д.В. Гичан, Д.Н. Тебенькова // Вопросы лесной науки. — 2023. — Т. 6. — № 3. — С. 24–75.
- 24.Гичан, Д.В. Оценка потоков растворенного органического углерода и азота на неиспользуемых сельскохозяйственных землях Вологодской области / Д.В.

- Гичан, Д.Н. Тебенькова, В.Н. Иванова, Е.В. Ручинская, А.А. Колычева, Д.В. Демидов, Н.Р. Шарапова. // Почвоведение. — 2025. — № 10. — С. 1293–1309.
25. Гичан, Д.В. Таксационные характеристики березовых древостоев, сформированных на заброшенной пашне Череповецкого района Вологодской области / Д.В. Гичан, Д.Н. Тебенькова, В.Н. Иванова, А.А. Колычева, Е.В. Ручинская, Н.Е. Шевченко, Д.В. Демидов, М.В. Стеркин, Н.Р. Шарапова. Свидетельство о государственной регистрации базы данных №2025625437, дата государственной регистрации 25 ноября 2025 г.
26. Гичан, Д.В. Масса, фракционный и химический состав опада березняков на неиспользуемых сельскохозяйственных землях Вологодской области / Д.В. Гичан, Д.Н. Тебенькова, В.Н. Иванова, С.А. Аргеткина, А.А. Колычева // Сибирский лесной журнал. — 2026. — № 2. — С. 71–80.
27. Гончарова, О.Ю. Эмиссия CO₂ почвами экотонной зоны севера Западной Сибири / О.Ю. Гончарова, Г.В. Матышак, М.В. Тимофеева, С.В. Чуванов, М.О. Тархов, А.В. Исаева // Почвоведение. — 2023. — № 9. — С. 1034–1048.
28. Горбачева, Т.Т. Органический углерод в водах подзолов ельников зеленомошных Кольского полуострова / Т.Т. Горбачева, Н.В. Лукина // Лесоведение. — 2004. — № 4. — С. 43–50.
29. Горбачева, Т.Т. Динамика содержания полифенолов при разложении опада и подстилки в ельниках зеленомошных Кольского полуострова / Т.Т. Горбачева, Н.В. Лукина, Н.А. Артемкина // Лесоведение. — 2006. — № 3. — С. 15–23.
30. Гульбе, А.Я. Процесс формирования молодняков древесных пород на залежи в южной тайге (на примере Ярославской области): дис... канд. биол. наук: 03.00.16 / Анастасия Яковлевна Гульбе. — Институт лесоведения Российской Академии Наук, 2009. — 167 с.
31. Данилов, Д.А. Возобновление ели и сосны на постагrogenных землях в Ленинградской области / Д.А. Данилов, С.С. Мандрыкин, В.И. Шестаков, Т.А. Шестакова // Актуальные проблемы лесного комплекса. — 2018. — № 51. — С. 28–31.

32. Добровольский, Г.В. Структурно-функциональная роль почв и почвенной биоты в биосфере / Г.В. Добровольский, И.П. Бабьева, Л.Г. Богатырев, А.С. Владыченский, И.С. Урусевская. — М.: ФГБУ "Издательство "Наука", 2003. — 364 с.
33. Дмитриев, А.В. Баланс углерода на постагрогенных дерново-подзолистых почвах / А.В. Дмитриев, А.В. Леднёв // Вестник Российской академии наук. — 2023. — Т. 93. — № 5. — С. 445–455.
34. Дричко, В.Ф. Скорости изменения кислотно-основных параметров, содержания общего углерода и состава гумуса в дерново-подзолистой песчаной почве при переходе от пашни к лесу при сукцессии залежных земель / В.Ф. Дричко, А.В. Литвинович, О.Ю. Павлова, Д.В. Чернов, В.М. Буре // Агрехимия. — 2015. — № 11. — С. 19–29.
35. Дубровина, И.А. Динамика свойств почв и экосистемные запасы углерода при разных типах землепользования (средняя тайга Карелии) / И.А. Дубровина, Е.В. Мошкина, А.В. Туюнен // Почвоведение. — 2022. — № 9. — С. 1112–1125.
36. Ершов, В.В. Фитогенное варьирование состава атмосферных выпадений и почвенных вод северотаежных лесов в условиях аэротехногенного загрязнения: дис. ... канд. биол. наук: 1.5.15 / Вячеслав Вячеславович Ершов. Апатиты, 2021. — 188 с.
37. Загреев, В.В. Общесоюзные нормативы для таксации лесов / В.В. Загреев, В.И. Сухих, А.З. Швиденко, Н.Н. Гусев, А.Г. Мошкалев. — М.: Колос, 1992. — 495 с.
38. Замолодчиков, Д.Г. Системы оценки и прогноза запасов углерода в лесных экосистемах // Устойчивое лесопользование. — 2011. — № 4(29). — С. 15–22.
39. Замолодчиков, Д.Г. Баланс углерода в тундровых и лесных экосистемах России: : дис. ... докт. биол. наук: 03.00.06 / Дмитрий Геннадьевич Замолодчиков. — Москва: МГУ имени М.В. Ломоносова, 2003. — 325 с.
40. Замолодчиков, Д.Г. Влияние лесных посадок на эмиссию диоксида углерода из почвы в Поволжье и Подонье / Д.Г. Замолодчиков, В.В. Каганов, А.С. Мостовая // Лесоведение. — 2022. — № 4. — С. 339–350.

41. Заугольнова, Л.Б. Типология и классификация лесов европейской России: методические подходы и возможности их реализации / Л.Б. Заугольнова, О.В. Морозова // Лесоведение. — 2006. — № 1. — С. 34–48.
42. Иванова, Е.А. Формирование и разложение древесного опада в лесных экосистемах в фоновых условиях и при аэротехногенном загрязнении // Вопр. лесной науки. — 2021. — Т. 4. — № 3. — С. 1–52.
43. Иванова, Е.А. «Формирование и разложение древесного опада в сосновых лесах на северном пределе распространения при аэротехногенном загрязнении»: автореф. дис. ... канд. биол. наук: 06.03.02 / Екатерина Александровна Иванова. — Москва; Апатиты, 2022. — 24 с.
44. Иванова, Е.А. Сравнительная оценка скорости разложения растительного опада в еловых и сосновых лесах на северном пределе распространения / Е.А. Иванова, М.А. Данилова, В.Э. Смирнов, В.В. Ершов // Вопросы лесной науки. — 2023. — Т. 6. — № 3. — С. 75–105.
45. Каверин, Д.А. Температурный режим почв постагрогенных экосистем при активизации самовосстановительной сукцессии тундровой растительности (Европейский северо-восток России) / Д.А. Каверин, А.В. Пастухов, А.Н. Панюков // Криосфера Земли. — 2019. — Т. 23. — № 5. — С. 58–66.
46. Карелин, Д.В. Влияние различных видов антропогенного воздействия на эмиссию парниковых газов в мерзлотных экосистемах / Д.В. Карелин, С.В. Горячкин, Д.Г. Замолотчиков, А.В. Долгих, Э.П. Зазовская, В.А. Шишков, Г.Н. Краев // Доклады Академии наук. — 2017. — Т. — 477. — № 5. — С. 610–612.
47. Карпачевский, Л.О. Почвенно-биогеоценологические исследования в лесных биогеоценозах / Л.О. Карпачевский, А.Д. Воронин, Е.А. Дмитриев, М.Н. Строганова, С.А. Шоба. — М.: Изд-во Московского университета, 1980. — 160 с.
48. Кечайкина, И.О. Постагрогенная трансформация органического вещества дерново-подзолистых почв / И.О. Кечайкина, А.Г. Рюмин, С.Н. Чуков // Почвоведение. — 2011. — № 10. — С. 1178–1192.

49. Классификация и диагностика почв России. — Смоленск: Ойкумена, 2004. — 341 с.
50. Кобак, К.И. Биотические компоненты углеродного цикла. — Л.: Гидрометеиздат, 1988. — 221 с.
51. Комарова, Т.В. Сукцессионная динамика потоков CO₂ и запасов органического углерода при зарастании залежи на дерново-палево-подзолистой почве // Материалы международной научной конференции молодых учёных и специалистов, посвящённой 150-летию со дня рождения В.П. Горячкина. — 2018. — С. 584–588.
52. Кожевникова, Н.К. Водная миграция макроэлементов в хвойно-широколиственных лесах Сихотэ-Алиня / Н.К. Кожевникова, Т.Н. Луценко, А.Г. Болдескул, С.Ю. Лупаков, В.В. Шамоу // Сибирский лесной журнал. — 2017. — № 3. — С. 60–73.
53. Кудеяров, В.Н. Выделение углекислого газа почвенным покровом России // Природа. — 1994. — № 7. — С. 37–43.
54. Кудеяров, В.Н. Оценка дыхания почв России / В.Н. Кудеяров, Ф.И. Хакимов, Н.Ф. Деева, А.А. Ильина, Т.В. Кузнецова, А.В. Тимченко // Почвоведение. — 1995. — № 1. — С. 33–42.
55. Кудеяров, В.Н. Почвенные источники углекислого газа на территории России // Глобальные изменения природной среды и климата: избранные научные труды / под ред. Г.А. Заварзина. — М.: Министерство науки и технологий РФ, 1999. — С. 165–201.
56. Кудеяров, В.Н. Пулы и потоки углерода в наземных экосистемах России / В.Н. Кудеяров, Г.А. Заварзин, С.А. Благодатский, А.В. Борисов, П.Ю. Воронин, В.А. Демкин, О.Г. Чертов. — М.: Наука, 2007. — 315 с.
57. Кудеяров, В.Н. Современное состояние углеродного баланса и предельная способность почв к поглощению углерода на территории России // Почвоведение. — 2015. — № 9. — С. 1049–1059.
58. Кудеяров, В.Н. Почвенное дыхание и секвестрация углерода (обзор) // Почвоведение. — 2023. — Т. 9. — С. 1011–1022.

59. Кузнецова, А.И. Аккумуляция углерода в песчаных и суглинистых почвах равнинных хвойно-широколиственных лесов в ходе послерубочных восстановительных сукцессий / А.И. Кузнецова, Н.В. Лукина, Е.В. Тихонова, А.В. Горнов, М.В. Горнова, В.Э. Смирнов, С.И. Чумаченко // Почвоведение. — 2019. — № 7. — С. 803–816.
60. Кузнецова, А.И. Влияние растительности на запасы почвенного углерода в лесах (обзор) // Вопросы лесной науки. — 2021. — Т. 4. — № 4. — С. 41–95.
61. Кузнецова, А.И. Влияние биотических и абиотических факторов на запасы почвенного углерода в лесах / А.И. Кузнецова, А.П. Гераськина, Н.В. Лукина, В.Э. Смирнов, Е.В. Тихонова, А.В. Горнов, Н.Е. Шевченко, Д.Н. Тебенькова, Е.В. Ручинская // Биоразнообразие и функционирование лесных экосистем. — М.: Товарищество научных изданий КМК. — 2021. — С. 131–152.
62. Кузнецова, А.И. Оценка выноса углерода с почвенными водами в доминирующих типах леса Брянского Полесья / А.И. Кузнецова, А.В. Горнов, М.В. Горнова, Д.Н. Тебенькова, А.Д. Никитина, В.А. Кузнецов // Почвоведение. — 2022. — № 9. — С. 1086–1097.
63. Кузнецова, А.И. Влияние растительности на запасы углерода в почвах доминирующих хвойно-широколиственных лесов Европейской части России дис.... канд. биол. наук: 06.03.02 / Анастасия Игоревна Кузнецова. — М., 2022. — 130 с.
64. Курганова, И.Н. Эмиссия и баланс диоксида углерода в экосистемах России: дис. ... докт. биол. наук: 03.00.16 / Ирина Николаевна Курганова. — М.: МГУ, 2010. — 401 с.
65. Курганова, И.Н. Пилотный карбоновый полигон в России: анализ запасов углерода в почвах и растительности / И.Н. Курганова, В.О. Лопес де Гереню, С.Л. Ипп, В.В. Каганов, Д.А. Хорошаев, Д.И. Рухович, Ю.В. Сумин, Н.Д. Дурманов, Я.В. Кузяков // Почвы и окружающая среда. — 2022. — № 2. — С. 6–21.
66. Курганова, И.Н. Динамика пулов углерода и биологической активности агродерново-подзолов южной тайги в ходе постагрогенной эволюции / И.Н.

- Курганова, В.М. Телеснина, В.И. Личко, Е.И. Караванова // Почвоведение. — 2021. — № 3. — С. 287–303.
67. Курганова, И.Н. Механизмы секвестрации почвенного углерода в процессе естественного лесозаращения пахотных угодий в различных биоклиматических зонах Европейской России // Научный семинар «Климаторегулирующие функции почв и их изменения в условиях антропогенного воздействия», 18–21 сент. 2023 г.
68. Курнаев, С.Ф. Лесорастительное районирование СССР. — М.: Наука, 1973. — 202 с.
69. Ларионова, А.А. Динамика интенсивности дыхания серой лесной почвы в зависимости от агроэкологических факторов: дис.... канд. биол. наук: 06.01.03 / Алла Александровна Ларионова. — М.: МГУ имени М.В. Ломоносова, 1988. — 122 с.
70. Латыпова, Л.И. Постагрогенная трансформация светло-серых лесных почв Предкамья и Предволжья Республики Татарстан: дис.... канд. биол. наук: 1.5.15 / Лейсан Илдаровна Латыпова. — М.: Казань, 2024. — 150 с.
71. Леднев, А.В. Современные почвообразовательные процессы в постагрогенных дерново-подзолистых почвах Удмуртской республики / А.В. Леднев, А.В. Дмитриев // Почвоведение. — 2021. — № 7. — С. 884–896.
72. Лиханова, Н.В. Изменение биоразнообразия и массы растений напочвенного покрова ельников средней тайги после сплошнелесосечной рубки // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. — 2012. — Т. 14, № 1–5. — С. 1309–1312.
73. Лоскутов, С.Р. Гигроскопические свойства подстилки хвойных и лиственных насаждений Средней Сибири / С.Р. Лоскутов, О.А. Шапченкова, Э.Ф. Ведрова, А.А. Анискина, Л.В. Мухортова // Сибирский экологический журнал. — 2013. — Т. 20. — № 5. — С. 695–702.
74. Лопес де Гереню, В.О. Методы количественной оценки потоков диоксида углерода из почв / В.О. Лопес де Гереню, И.Н. Курганова, Д.Г. Замолодчиков,

- В.Н. Кудеяров // Методы исследований органического вещества почв. — М.: Россельхозакадемия. — ГНУ ВНИПТИОУ. — 2005. — С. 408–425.
- 75.Лукина, Н.В. Биогеохимические циклы в лесах Севера в условиях аэротехногенного загрязнения / Н.В. Лукина, В.В. Никонов. — 1996. — 263 с.
- 76.Лукина, Н.В. Питательный режим лесов северной тайги: природные и техногенные аспекты / Н.В. Лукина, В.В. Никонов. — 1998. — 189 с.
- 77.Лукина, Н.В. Питательный режим почв северотаежных лесов / Н.В. Лукина, Л.М. Полянская, М.А. Орлова. — М.: Наука, 2008. — 224 с.
- 78.Лукина, Н.В. Аккумуляция углерода в лесных почвах и сукцессионный статус лесов / Н.В. Лукина, А.П. Гераськина, А.И. Кузнецова, А.В. Горнов, Н.Е. Шевченко, Е.В. Басова [и др.]; отчет о НИР. — М.: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов Российской академии наук, 2018. — 154 с.
- 79.Лукина, Н.В. Функциональная классификация лесов: актуальность и подходы к разработке / Н.В. Лукина, А.П. Гераськина, А.И. Кузнецова, А.В. Горнов, Н.Е. Шевченко, Е.В. Басова // Лесоведение. — 2021. — № 6. — С. 566–580.
- 80.Луценко, Т.Н. Концентрации и экспорт растворённого органического углерода в ландшафтах бассейна Верхней Уссури / Т.Н. Луценко, Н.К. Кожевникова, А.Г. Болдескул, В.В. Шамов // Материалы XVI Совещания географов Сибири и Дальнего Востока. — 2021. — С. 150–152.
- 81.Люри, Д.И. Динамика сельскохозяйственных земель России в XX веке и постагрогенное восстановление растительности и почв / Д.И. Люри, С.В. Горячкин, Н.А. Караваева, Е.А. Денисенко, Т.Г. Нефедова. — 2010. — 284 с.
- 82.Люри, Д.И. Изменение почвенного дыхания в ходе постагрогенной сукцессии на песчаных почвах в южной тайге / Д.И. Люри, Д.В. Карелин, А.В. Кудиков, С.В. Горячкин // Почвоведение. — 2013. — № 9. — С. 1060–1061.
- 83.Макурина, О.Н. Биохимические основы взаимодействия некоторых актиноризных древесных растений с актиномицетами рода *Frankia* / О.Н. Макурина, Е.А. Радучева // Бюллетень Самарская Лука. — 2005. — № 16. — С. 226–231.

84. Мелехов, И.С. Лесоведение: учебник. — М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1980. — 408 с.
85. Мелёхов, В.И. Лесоводственный потенциал неиспользуемых сельскохозяйственных угодий / В.И. Мелёхов, А.М. Антонов, Д.В. Лохов // Arctic Environmental Research. — 2011. — № 3. — С. 62–66.
86. Минин, А.А. Феноиндикация изменений климата за период 1976–2015 гг. в центральной части Европейской России: береза бородавчатая (повислая) (*Betula verrucosa* Ehrh. (*B. pendula* Roth)), черемуха обыкновенная (*Radus avium* Mill.), рябина обыкновенная (*Sorbus aucuparia* L.), липа мелколистная (*Tilia cordata* Mill.) / А.А. Минин, Э.Я. Ранькова, Е.Г. Рыбина, Ю.А. Буйволов, И.И. Сапельникова, Т.Д. Филатова // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. — 2017. — Т. 28. — № 3. — С. 5–22.
87. Миркин, Б.М. Словарь понятий и терминов современной фитоценологии / Б.М. Миркин, Г.С. Розенберг, Л.Г. Наумова. — М.: Наука, 1989. — 223 с.
88. Москаленко, С.В. Возобновление деревьев на бывших пахотных землях в заповеднике «Калужские засеки» / С.В. Москаленко, М.В. Бобровский // Разнообразие растительного мира. — 2014. — № 1(3). — С. 48–54.
89. Мошкина, Е.В. Особенности естественного восстановления лесных экосистем на бывших сельскохозяйственных землях (на примере южного агроклиматического района Карелии) / Е.В. Мошкина, М.В. Медведева, А.В. Туюнен, А.Ю. Карпечко, Н.В. Геникова, И.А. Дубровина, Л.М. Кулакова // Биосфера. — 2019. — Т. 11, № 3. — С. 134–145.
90. Наквасина, Е.Н. Динамика запасов углерода при формировании лесов на постагрогенных землях / Е.Н. Наквасина, Ю.Н. Шумилова // Известия ВУЗов. Лесной журнал. — 2021. — № 1. — С. 46–59.
91. Новикова, Л.А. Восстановление растительности на залежах «Островцовской лесостепи» / Л.А. Новикова, М.О. Полозова // Вестник Оренбургского государственного университета. — 2009. — № 6. — С. 286–290.

92. Об утверждении Лесоустроительной инструкции: приказ Минприроды России от 5 августа 2022 г. № 510. URL: <https://docs.cntd.ru/document/542621790> (дата обращения: 20.03.2025).
93. Овсебян, Л.А. Фракционный состав органического вещества и микробная активность постагрогенных серых лесных почв и черноземов: дис. ... канд. биол. наук: 03.02.08, 03.02.13. / Лилит Арменовна Овсебян. — Пушино, 2018. — 202 с.
94. Онучин, А.А. Влагооборот горных лесов Сибири (локальные и региональные особенности): дис. ... д-ра биол. наук: 03.00.16. / Александр Александрович Онучин. — Красноярск, 2003. — 221 с.
95. Осипов, А.Ф. Эмиссия CO₂ с поверхности почвы на 10-летней вырубке среднетаежного сосняка черничного на европейском Северо-Востоке России // Почвоведение. — 2023. — № 9. — С. 1049–1058.
96. Осипов, А.Ф. Поступление древесного опада на поверхность почвы среднетаежных сосняков на европейском северо-востоке России // Сибирский лесной журнал. — 2024. — № 5. — С. 103–111.
97. Погода и климат. URL: <http://www.pogodaiklimat.ru/> (дата обращения: 01.10.2025).
98. Поляков, А.Ф. Водорегулирующая роль горных лесов Украины и пути ее оптимизации при ведении хозяйства: автореф. дис. ... докт. сельхоз. наук: 06.03.13 / Алексей Федорович Поляков. — Киев, 1984. — 36 с.
99. Постановление Правительства РФ от 14 мая 2021 г. № 731 "О Государственной программе эффективного вовлечения в оборот земель сельскохозяйственного назначения и развития мелиоративного комплекса Российской Федерации". URL: <https://base.garant.ru/400773886/> (дата обращения 27.04.2025).
100. Плеханова, И.О. Влияние атмосферных выпадений на микроэлементный состав почв модельных экосистем почвенных лизиметров / И.О. Плеханова, Г.В. Абросимова // Вестник Моск. ун-та. Сер. 17, Почвоведение. — 2016. — № 3. — С. 47–53.

101. 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. — № 12. — С. 1472–1481.
102. Пристова, Т.А. Формирование лесной подстилки лиственных насаждений средней тайги Республики Коми / Т.А. Пристова, Ф.М. Хабибулина, Ю.А. Виноградова, П.Г. Мельник // Лесной вестник. — 2011. — № 3. — С. 41–45.
103. Пристова, Т.А. Динамика поступления надземного опада древесных растений в березово-еловом молодняке средней тайги Республики Коми // Экосистемы. — 2021. — № 28. — С. 55–61.
104. Приказ Рослесхоза от 10.11.2011 N 472 (ред. от 15.03.2018) "Об утверждении Методических рекомендаций по проведению государственной инвентаризации лесов". URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_127414/0bac436d15c1212776da4bb7e2065f87e330aca0/ (дата обращения 28.01.2025).
105. Приказ Минприроды России от 27.05.2022 N 371 “Об утверждении методик количественного определения объемов выбросов парниковых газов и поглощений парниковых газов”. URL: <https://carbonreg.ru/pdf/Общие%20НПА/Приказ%20Минприроды%20РФ%20от%2027.05.2022%20N%20371.pdf> (дата обращения: 01.10.2025).
106. Припутина, И.В. Применение математических моделей ROMUL и ROMUL_HUM для оценки эмиссии CO₂ и динамики органического вещества в серой лесной почве под лиственным лесом в Южном Подмосковье / И.В. Припутина, С.С. Быховец, П.В. Фролов, О.Г. Чертов, И.Н. Курганова, В.О. Гереню, Д.В. Сапронов, Т.Н. Мякшина // Почвоведение. — 2020. — № 10. — С. 1262–1275.
107. Прокушкин, А.С. Потоки растворенного органического вещества в лиственничниках криолитозоны Средней Сибири / А.С. Прокушкин, И.В. Токарева, С.Г. Прокушкин, А.П. Абаимов, Г.А. Гутгенбергер // Экология. — 2008. — № 3. — С. 163–172.

108. Рахманов, В.В. Лесная гидрология (сер. Итоги науки и техники. Лесоведение и лесоводство. Т. 3). — М.: Изд-во ВИНТИ, 1981. — 181 с.
109. Резолюция по итогам научных дебатов «Лесные климатические проекты в России». г. Москва, 19 октября 2021 г. URL: <http://rbf-gas.ru/academicdispute/2021-10-19/> (дата обращения 01.09.2024).
110. Резолюция научно-практического семинара по проблемам сельского лесоводства. г. Москва, 02.04.2026 г. URL: <http://rbf-gas.ru/academicdispute/2021-10-19/> (дата обращения 20.04.2026).
111. Решетникова, Т.В. Формирование органического вещества почвы в культурах основных лесобразующих пород Сибири: дис.... канд. биол. наук: 03.02.08 / Татьяна Валерьевна Решетникова. — Красноярск, 2015. — 25 с.
112. РИТМ Углерода. Мониторинг климатически активных веществ в наземных экосистемах. URL: <https://ritm-c.ru/about/goals-objectives/> (дата обращения: 24.07.2025).
113. Романовская, А.А. Основы мониторинга антропогенных эмиссий и стоков парниковых газов (CO₂, N₂O, CH₄) в животноводстве, при сельскохозяйственном землепользовании и изменении землепользования в России: дис. ... д-ра биол. наук: 03.00.16. / Анна Анатольевна Романовская. — М., 2008. — 419 с.
114. Романовская, А.А. Динамика элементов баланса углерода на неиспользуемых пахотных угодьях Валдайской возвышенности / А.А. Романовская, В.Н. Коротков, Р.Т. Карабань, Н.С. Смирнов // Экология. — 2012. — № 5. — С. 347–354.
115. Романова, А.И. Пространственно-временной анализ почвенных показателей углеродного цикла в постагрогенных экосистемах южного Подмосковья / А.И. Романова, В.А. Маханцева, Т.Н. Лебедева, Т.Ю. Волкова, А.И. Журавлева, Е.С. Митрохина, К.В. Иващенко // Почвы и окружающая среда. — 2024. — Т. 7, № 3.
116. Рыбакова, А.Н. Трансформация некоторых физических свойств постагрогенных серых почв залежей при различном использовании / А.Н.

- Рыбакова, Г.А. Сорокина // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. — 2013. — № 6. — С. 73–79.
117. Рыжова, И.М. Динамика и структура запасов углерода в постагрогенных экосистемах южной тайги / И.М. Рыжова, А.А. Ерохова, М.А. Подвезенная // Почвоведение. — 2014. — № 12. — С. 1426–1435.
118. Савинов, Ю.А. Геоморфологическое районирование Вологодской области // Природное районирование Вологодской области для целей сельского хозяйства / Ю.А. Савинов, В.П. Романова. — Вологда: Северо-западное книжное изд-во, 1970. — С. 11–51.
119. Сапронов, Д.В. Динамика поступления углерода в почву с опадом // Лесные почвы и функционирование лесных экосистем: материалы VIII Всероссийской научной конференции с международным участием. — М.: ЦЭПЛ РАН, 2019. — С. 300.
120. Смагин, А.В. Моделирование гидрологической функции лесной подстилки // Экологический вестник Северного Кавказа. — 2011. — Т. 7. — № 1. — С. 10–19.
121. Собачкин, Р.С. Структура горючих материалов в сосняках разного возраста Красноярской лесостепи / Р.С. Собачкин, Н.М. Ковалева, А.Е. Петренко, Д.С. Собачкин // Лесоведение. — 2017. — № 6. — С. 431–436.
122. Стратегия социально-экономического развития России с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года. Утв. Распоряж. Правительства РФ от 29 октября 2021 года № 3052-р. Эл. ресурс. URL: <http://government.ru/docs/43708/> (дата обращения 02.02.2026 г.).
123. Сукачев, В.Н. Основы лесной биогеоценологии / В.Н. Сукачев, Н.В. Дылис; Акад. наук СССР. Ботан. ин-т и Лаборатория лесоведения. — М.: Наука, 1964. — 574 с.
124. Султанбаева, Р.Р. Поступление и миграция растворимого органического углерода в почвах лесных экосистем подзоны широколиственно–хвойных лесов / Р.Р. Султанбаева, Г.Н. Копцик, И.Е. Смирнова, С.В. Копцик // Вестник Моск. ун-та. Сер. 17, Почвоведение. — 2015. — № 4. — С. 37–42.

125. Сусллова, Т.А. Флора лесов // Леса земли Вологодской / Т.А. Сусллова, А.Б. Чхобадзе. — Вологда: Легия, 1999. — С. 137–170.
126. Суховеева, О.Э. Дыхание почвы в аграрных и природных экосистемах европейской территории России / О.Э. Суховеева, Д.В. Карелин, А.Н. Золотухин, А.В. Почикалов // Почвоведение. — 2023. — № 9. — С. 1077–1088.
127. Сушко, С.В. Эмиссия CO₂, микробная биомасса и базальное дыхание чернозема при различном землепользовании / С.В. Сушко, Н.Д. Ананьева, К.В. Иващенко, В.Н. Кудеяров // Почвоведение. — 2019. — № 9. — С. 1081–1091.
128. Телеснина, В.М. Особенности динамики растительного покрова при естественном постагрогенном лесовосстановлении (флористический состав и экологические группы растений) // Бюллетень Брянского отделения Русского ботанического общества. — 2014. — № 1(3). — С. 55–56.
129. 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. Овсебян, В.И. Личко, А.М. Ермолаев, Д.М. Мирин // Почвоведение. — 2017. — № 12. — С. 1514–1534.
130. Телеснина, В.М. Динамика поступления растительного опада и некоторых свойств лесных подстилок при постагрогенном лесовосстановлении в условиях южной тайги / В.М. Телеснина, Л.Г. Богатырёв, А.И. Бенедиктова, Ф.И. Земсков, М.И. Маслов // Вестник Московского университета. Серия 17. Почвоведение. — 2019. — № 4. — С. 3–10.
131. Телеснина, В.М. Динамика свойств почв во взаимосвязи с растительностью при естественном постагрогенном зарастании сенокосов (Костромская область) // Вестник Московского университета. Серия 17. Почвоведение. — 2021. — № 2. — С. 18–28.
132. Таллер, Е.Б. Некоторые особенности динамики качественного состава органического вещества хроноряда дерново-подзолистых почв в процессе лесовосстановления / Е.Б. Таллер, З.С. Артемьева, Н.П. Кириллова, Н.Н. Данченко // Бюллетень почвенного института им. В.В. Докучаева. — 2019. — № 98. — С. 77–104.

133. Терехова, Д.А. Макрофауна и органическое вещество в постагрогенных песчаных и супесчаных почвах Северо-Запада Смоленской области (Россия) / Д.А. Терехова, М.А. Смирнова, А.П. Гераськина, О.В. Шопина, А.И. Кузнецова, И.М. Бавшин, И.Н. Семенков // Почвоведение. — 2023. — № 8. — С. 981–996.
134. Усольцев, В.А. Сравнительный мета анализ аллометрических моделей биомассы быстрорастущих лиственных пород / В.А. Усольцев, И.С. Цепордей, А.А. Парамонов, С.В. Третьяков, С.В. Коптев, А.А. Карабан, В.П. Часовских // Биосфера. — 2023. — Т. 15. — № 1. — С. 7–20.
135. Ходжаева, А.К. Состав атмосферных выпадений и почвенных вод в смешанном лесу Приокско-Террасного государственного заповедника / А.К. Ходжаева, Д.В. Сапронов, Д.Д. Гереню, Н.Б. Зинякова, Д.А. Хорошаев, И.Н. Курганова, В.А. Аблеева // Вопросы лесной науки. — 2024. — Т. 7. — № 4. — С. 1–21.
136. Ценофонд лесов Европейской России. URL: <http://cepl.rssi.ru/bio/flora/main.htm> (дата обращения: 20.03.2024).
137. Чалая, Т.А. Запасы углерода в почвах и растительности постагрогенных ландшафтов южной тайги: дис. ... канд. биол. наук: 03.02.13. / Татьяна Анатольевна Чалая. — Москва, 2012. — 148 с.
138. Черепанов, С.К. Сосудистые растения России и сопредельных государств. — СПб.: Мир и семья, 1995. — 992 с.
139. Шильцова, Г.В. Влияние полога соснового и берёзового леса на химический состав осадков в заповеднике «Кивач» / Г.В. Шильцова, В.Г. Ласточкина // Тр. Карельского научного центра РАН. — 2006. — № 10. — С. 180–184.
140. Шишов, Л.Л. Классификация и диагностика почв России / Л.Л. Шишов, В.Д. Тонконогов, И.И. Лебедева. — Смоленск: Ойкумена, 2004. — 235 с.
141. Шоба, С.А. Национальный атлас почв Российской Федерации / С.А. Шоба, Г.В. Добровольский, И.О. Алябина, И.С. Урусевская, О.В. Чернова, Н.А. Аветов, Л.Ф. Январева. — 2011.

142. Шорохова, Е.В. Характеристика классов разложения древесного детрита ели, березы и осины в ельниках средней подзоны тайги / Е.В. Шорохова, А.А. Шорохов // Тр. СПбНИИЛХ. — 1999. — № 1. — С. 17–24.
143. Шорохова, Е.В. Запасы и экосистемные функции крупных древесных остатков таежных лесов: дис. ... д-ра биол. наук: 03.02.08. / Екатерина Владимировна Шорохова. — Санкт-Петербург, 2020. — 299 с.
144. Шпедт, А.А. Оценка скорости восстановления гумусного состояния почв Красноярского края в условиях залежи / А.А. Шпедт, П.В. Вергейчик // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. — 2014. — № 6 (116). — С. 48–52.
145. Юркевич, М.Г. Изменения сообществ почвообитающих нематод при постагрогенной трансформации торфяных почв и растительности / М.Г. Юркевич, А.А. Суцук, Е.М. Матвеева, Д.С. Калинин // Почвоведение. — 2020. — № 5. — С. 627–638.
146. Ярошенко, А.А. Сельское лесоводство в России: ситуация на начало 2026 года. — 2026. URL: <http://https://forest.earthtouches.me/wiki/tpost/7ayyuubps1-selskoe-lesovodstvo-v-rossii-situatsiya> (дата обращения: 20.04.2025).
147. Aber, J.D. Terrestrial Ecosystems / J.D. Aber, J.M. Melillo. — Saunders College Publishing, 1991. — 428 p.
148. Aerts, R. Climate, leaf litter chemistry and leaf litter decomposition in terrestrial ecosystems: A puzzling relationship // Oikos. — 1997. — Vol. 79. — № 3. — Pp. 439–449.
149. Allison, S.D. A trait-based approach for modelling microbial litter decomposition // Ecology Letters. — 2012. — Vol. 15. — № 10. — Pp. 1058–1070.
150. Arisci, S. The role of forest type in the variability of DOC in atmospheric deposition at forest plots in Italy / S. Arisci, M. Rogora, A. Marchetto, F. Dichiaro // Environ. Monitoring Assessment. — 2012. — Vol. 184. — Pp. 3415–3425.
151. African Union Climate Change and Resilient Development Strategy and Action Plan 2022-2032. — 2022. Эл. ресурс. URL:

- <https://au.int/en/documents/20220628/african-union-climate-change-and-resilient-development-strategy-and-action-plan> (дата обращения: 02.02.2026 г.).
152. Baetten, L. Unexpected Understory community Develop After 30 Years in Ancient and Post-Agricultural Forests / L. Baetten, M. Hermy, S. Van Daele, K. Verheyen // *Journal of Ecology*. — 2010. — Vol. 98, № 6. — Pp. 1447–1453.
153. Bani, A. The role of microbial community in the decomposition of leaf litter and Deadwood / A. Bani, S. Pioli, M. Ventura, P. Panzacchi, L. Borruso, R. Tognetti, G. Tonon, L. Brusetti // *Applied Soil Ecology*. — 2018. — Vol. 126. — Pp. 75–84.
154. Bārdulis, A. Soil-to-atmosphere GHG fluxes in hemiboreal deciduous tree and willow coppice-based agroforestry systems with mineral soil / A. Bārdulis, D. Purviņa, K. Makovskis, A. Bārdule, D. Lazdiņa // *Land*. — 2023. — Vol. 12. — № 3. — Pp. 715.
155. Benson, D.R. Biology of Frankia strains, actinomycete symbionts of actinorhizal plants / D.R. Benson, W.B. Silvester // *Microbiological reviews*. — 1993. — Vol. 57, № 2. — Pp. 293–319.
156. Berg, B. Decomposition Lifestelature for foliar litter. — a theory for Influencing factors // *Soil Biology and Biochemistry*. — 2014. — Vol. 78. — Pp. 222–232.
157. Becker, J. Annual litter fall dynamics and nutrient deposition depending on elevation and land use at Mt. Kilimanjaro / J. Becker, H. Pabst, J. Mnyonga, Y. Kuzyakov // *Biogeosciences*. — 2015. — Vol. 12. — Pp. 5635–5646.
158. Binkley, D. Why do tree species affect soils? The warp and woof of tree soil Interaction / D. Binkley, C. Giardina // *Biogeochemistry*. — 1998. — Vol. 42. — № 1-2. — Pp. 89–106.
159. Blanco, J.A. Soil C/N ratios cause Opposition Excuses in Forests Indar to grasslands on on decomposition rates and Standing factors in Southern European Ecosystems / J.A. Blanco, M. Duran, J. Luquin, L. San Emeterio, A. Yeste, R.M. Canals // *Science of The Total Environment*. — 2023. — Vol. 888. — Pp. 164118.
160. Bond-Lamberty, B. A Global database of soil respiration data / B. Bond-Lamberty, A. Thomson // *Biogeosciences*. — 2010. — Vol. 7. — № 6. — Pp. 1915–1926.

161. Bond-Lamberty, B. A global relationship between the heterotrophic and autotrophic components of soil respiration? / B. Bond-Lamberty, C. Wang, S.T. Gower // *Global Change Biology*. — 2004. — Vol. 10. — № 10. — Pp. 1756–1766.
162. Bradford, M.A. Thermal adaptation of soil microbial Respiration to LANE Temperature / M.A. Bradford, E.D. Vance, P.B. Reich, C.M. Harding // *Ecology Letters*. — 2008. — Vol. 11. — № 12. — Pp. 1316–1327.
163. Brechet, L. Do tree species cerebral influence soil Respiration in The Forests? A Test based on on 16 tree species Planted in monospecific plots / L. Brechet, S. Ponton, J. Roy, V. Freycon, M.M. Coûteaux, D. Bonal, E. Epron // *Plant and Soil*. — 2009. — Vol. 319. — № 1. — Pp. 235–246.
164. Caprez, R. Forest soil respiration reflects plant productivity across a temperature gradient in the Alps / R. Caprez, P.A. Niklaus, C. Korner // *Oecologia*. — 2012. — Vol. 170. — № 4. — Pp. 1143–1154.
165. Chang, Z.Q. Analysis of the spatial and temporal changes in soil CO₂ flux in alpine meadow of Qilian Mountain / Z.Q. Chang, Q. Feng, J.H. Si, Y.H. Su, H.Y. Xi, J.L. Li // *Environ Geol*. — 2009. — Vol. 58. — № 3. — Pp. 483–491.
166. Chapin, F.S. III. *Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology* / F.S. III Chapin, P.A. Matson, H.A. Mooney. — Springer, 2002. — 436 p.
167. Chave, J. Regional and seasonal patterns of litterfall in tropical South America / J. Chave, D. Navarrete, S. Almeida, E. Álvarez, L.E. Aragão, D. Bonal, Y. Malhi // *Biogeosciences*. — 2010. — Vol. 7. — № 1. — Pp. 43–55.
168. Chen, S. Dissolved organic carbon (DOC) input to the soil: DOC fluxes and their partitions during the growing season in a cool-temperate broad-leaved deciduous forest, central Japan / S. Chen, S. Yoshitake, Y. Iimura, C. Asai, T. Ohtsuka // *Ecol. Res*. — 2017. — Vol. 32. — Pp. 713–724.
169. Chen, S. Global annual soil respiration in relation to climate, soil properties and vegetation characteristics: Summary of available data / S. Chen, J. Zou, Z. Hu, H. Chen, Y. Lu // *Agricultural and Forest Meteorology*. — 2014. — Vol. 198. — Pp. 335–346.

170. Chen, H.Y. The contribution of litterfall to net primary production during secondary succession in the boreal forest / H.Y. Chen, A.N. Brant, M. Seedre, B.W. Brassard, A.R. Taylor // *Ecosystems*. — 2017. — Vol. 20. — № 4. — Pp. 830–844.
171. Chen, Z. Nitrogen fertilization stimulated soil heterotrophic but not autotrophic respiration in cropland soils: A greater role of organic over inorganic fertilizer / Z. Chen, Y. Xu, Y. He, X. Zhou, J. Fan, H. Yu, W. Ding // *Soil Biology and Biochemistry*. — 2018. — Vol. 116. — Pp. 253–264.
172. Chen, C. Meta-analysis shows positive effects of plant diversity on microbial biomass and respiration / C. Chen, H.Y. Chen, X. Chen, Z. Huang // *Nature communications*. — 2019. — Vol. 10. — № 1. — Pp. 1332.
173. Chenu, C. Methods for studying soil organic matter: nature, dynamics, spatial accessibility, and interactions with minerals / C. Chenu, C. Rumpel, C. Védère, P. Barré // *Soil microbiology, ecology and biochemistry*. — Elsevier, 2024. — C. 369–406.
174. Chevan, A. Hierarchical partitioning / A. Chevan, M. Sutherland // *The American Statistician*. — 1991. — Vol. 45. — № 2. — Pp. 90–96.
175. Ciais, P. Carbon and Other Biogeochemical Cycles / P. Ciais, C. Sabeine, G. Bala, L. Bopp, V. Brovkin, J. Canadell, A. Chhabra, R. DeFries, J. Galloway, M. Heimann, C. Jones, C. Le Quéré, R.B. Myneni, S. Piao, P. Thornton // *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Work Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. — Cambridge University Press, 2013. — Pp. 465–570.
176. Clarke, N. Part XIV: Sampling and Analysis of Deposition. Version 2022-1 / N. Clarke, D. Lindra, E. Ulrich, R. Mosello, J. Derome, K. Derome, N. Kinig, G. Livblad, G.P.J. Draaijers, K. Hansen, A. Thimonier, P. Waldner, A. Verstraeten. — In: *Manual on methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forests*. Thünen Institute of Forest Ecosystems, Eberswalde, Germany, 2020. — 34 p. URL: <http://www.icp-forests.org/Manual.htm> (дата обращения: 20.03.2025).

177. Cools, N. Sampling and analysis of soil / N. Cools, B. De Vos // Manual on methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forests. — Thünen Institute of Forest Ecosystems, Eberswalde, Germany, 2025. — Pp. 28.
178. Crowther, T.W. The Global soil community and its influence on Biogeochemistry / T.W. Crowther, D.S. Maynard, S.M. Thomas, A. Lehmann, M.A. Bradford // Science. — 2019. — Vol. 365. — № 6455. — Pp. 0552.
179. Daal, R.C. Greenhouse gas fluxes From Natural Ecosystems / R.C. Daal, D.E. Allen // Australian Journal of Botany. — 2008. — Vol. 56. — № 5. — Pp. 369–407.
180. Davidson, E.A. Belowground carbon allocation in forests estimated from litterfall and IRGA-based soil respiration measurements / E.A. Davidson, K. Savage, P. Bolstad, D.A. Clark, P.S. Curtis, D.S. Ellsworth, D. Zak // Agricultural and Forest Meteorology. — 2002. — Vol. 113. — № 1-4. — Pp. 39–51.
181. Davidson, E.A. Temperature Sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to Climate Change / E.A. Davidson, I.A. Janssens // Nature. — 2006. — Vol. 440. — № 7081. — Pp. 165–173.
182. Davidson, E.A. On the variability of respiration in terrestrial ecosystems: moving beyond Q10 / E.A. Davidson, I.A. Janssens, Y. Luo // Global Change Biology. — 2006. — Vol. 12. — Pp. 154–164.
183. De Deyn, G.B. Plant functional traits and soil carbon sequestration in Changing Ecosystems / G.B. De Deyn, J.H.C. Cornelissen, R.D. Bardgett // Ecology Letters. — 2008. — Vol. 11. — № 4. — Pp. 304–315.
184. Deng, W. Effects of leaf type, litter mass and rainfall characteristics on the interception storage capacity of leaf litter based on process simulation / W. Deng, X. Zheng, S. Xiao, Q. Chen, Y. Gao, L. Zhang, Y. Liu // Journal of Hydrology. — 2023. — Vol. 624. — Pp. 129943.
185. Dias, A.T.C. Plant species richness regulates soil respiration through changes in productivity / A.T.C. Dias, J. van Ruijven, F. Berendse // Oecologia. — 2010. — Vol. 163. — № 3. — Pp. 805–813.

186. Dolezal, A.G. Interacting stressors matter: diet quality and virus infection in honeybee health / A.G. Dolezal, J. Carrillo-Tripp, T.M. Judd, W. Allen Miller, B.C. Bonning, A.L. Toth // *Royal Society open science*. — 2019. — Vol. 6. — № 2. — Pp. 181803.
187. Du, J. Effects of rainfall intensity and slope on interception and precipitation partitioning by forest litter layer / J. Du, J. Niu, Z. Gao, X. Chen, L. Zhang, X.Li, Z. Zhu // *Catena*. — 2019. — Vol. 172. — Pp. 711–718.
188. Epron, D. Long term Effects of Forest Management on carbon Storage in French Forests / D. Epron, N. Breda, Y. Gonthier // *Forest Ecology and Management*. — 2004. — Vol. 188. — № 1–3. — Pp. 169–179.
189. Ershov, V. Estimation of carbon and nitrogen contents in forest ecosystems in the background areas of the Russian Arctic (Murmansk region) / V. Ershov, T. Sukhareva, N. Ryabov, E. Ivanova, I. Shtabrovskaya // *Forests*. — 2023. — Vol. 15. — № 1. — Pp. 29.
190. Evans, L.R. Dissolved organic carbon production and flux under long-term litter manipulations in a Pacific Northwest old-growth forest / L.R. Evans, D. Pierson, K. Lajtha // *Biogeochemistry*. — 2020. — Vol. 149. — Pp. 75–86.
191. Falkengren Grerup, U. Land Use Effects on soil N, P, C and pH in a north European Region / U. Falkengren Grerup, D.J. ten Brink, J. Brunet // *Agriculture, Ecosystems & Environment*. — 2000. — Vol. 77. — № 3. — Pp. 245–258.
192. Feng, C. End-of-life litterfall contribution to carbon and nutrient accumulation in formerly degraded Forests: A case study in Northeastern China / C. Feng, Z. Wang, Y. Ma, S. Fu, H.Y. Chen // *Forest Ecology and Management*. — 2019. — Vol. 432. — Pp. 832–839.
193. Framstad, E. Biodiversity, carbon storage and dynamics of northern old forest / E. Framstad, H.de Wit, R. Mäkipää, M. Larjavaara, L. Vesterdal, E. Karlton. — Copenhagen: Nordic Council of Ministers, 2013.
194. 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, G. Alavi // *Forest ecology and management*. — 2011. — Vol. 262. — № 9. — Pp. 1742–1747.
195. Fu, X. Soil respiration as affected by vegetation types in a semiarid region of China / X. Fu, M. Shao, X. Wei, H. Wang // *Soil Science and Plant Nutrition*. — 2013. — Vol. 59. — № 5. — Pp. 715–726.
196. Gaitnieks, T. Antagonism of microflora of spruce rhizosphere against *Heterobasidion annosum* / T. Gaitnieks, N. Arhipova, V. Nikolajeva, L. Vulfa, I. Balašova // 2008.
197. Gerrits, A.M.J. Spatial and temporal variability of canopy and forest floor interception in a beech forest / A.M.J. Gerrits, L. Pfister, H.H.G. Savenije // *Hydrological processes*. — 2010. — Vol. 24. — № 21. — Pp. 3011–3025.
198. Gichan, D.V. Carbon Pools in Forest and Meadow Postagrogenic Ecosystems on Albic Endocalcaric Retisols of Southern Taiga / D.V. Gichan, D.M. Tebenkova, V.N. Ivanova, N.E. Shevchenko, E.V. Ruchinskaya, A.A. Kolycheva, N.R. Sharapova, D.N. Tebenkova, V.N. Ivanova, N.E. Shevchenko, E.V. Ruchinskaya, A.A. Kolycheva, A.D. Nikitina, N.V. Korotkova, A.D. Kataev, D.V. Demidov, N.R. Sharapova // *Eurasian Soil Science*. — 2026. — Vol. 59. — № 75. DOI: 10.1134/S1064229325603841.
199. Gielen, B. The importance of dissolved organic carbon fluxes for the carbon balance of a temperate Scots pine forest / B. Gielen, J. Neiryneck, S. Luyssaert, I.A. Janssens // *Agricult. Forest Meteorol.* — 2011. — Vol. 151. — Pp. 270–278.
200. Goffin, S. Characterization of the soil CO₂ production and its carbon isotope composition in forest soil layers using the flux-gradient approach / S. Goffin, M. Aubinet, M. Maier, C. Plain, H. Schack-Kirchner, B. Longdoz // *Agric for Meteorol.* — 2014. — Vol. 188. — Pp. 45–57.
201. Guggenberger, G. Dissolved organic matter in soil: challenging the paradigm of sorptive preservation / G. Guggenberger, K. Kaiser // *Geoderma*. — 2003. — Vol. 113, № 3-4. — Pp. 293–310.
202. Guo, L.B. Soil carbon Stocks and Land Use Change: a meta Analysis / L.B. Guo, R.M. Gifford // *Global Change Biology*. — 2002. — Vol. 8. — № 4. — Pp. 345–360.

203. Haddix, M.L. Dual, differential isotope labeling shows the preferential movement of labile plant constituents into mineral-bonded soil organic matter / M.L. Haddix, E.A. Paul, M.F. Cotrufo // *Global Change Biology*. — 2016. — Vol. 22. — № 6. — Pp. 2301–2312.
204. Halonen, O. Nutrient analysis methods / O. Halonen, H. Tulkki, J. Derome // *Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja*. — 1983. — Vol. 121. — Pp. 1–28.
205. Helvey, J.D. Canopy and litter interception of rainfall by hardwoods of eastern United States / J.D. Helvey, J.H. Patric // *Water resources research*. — 1965. — Vol. 1. — № 2. — Pp. 193–206.
206. Hibbard, K.A. An analysis of soil respiration across northern hemisphere temperate ecosystems / K.A. Hibbard, B.E. Law, M. Reichstein, J. Sulzman // *Biogeochemistry*. — 2005. — Vol. 73. — № 1. — Pp. 29–70.
207. Houghton, R.A. Aboveground Forest biomass and the Global carbon balance / R.A. Houghton // *Global Change Biology*. — 2005. — Vol. 11. — № 6. — Pp. 945–958.
208. Hu, C. The relationships between biomass and soil respiration across different forest management practices / C. Hu, J.P. Lei, J.Z. Wan // *Forests*. — 2024. — Vol. 15. — № 4. — Pp. 712.
209. Ignatov, M.S. Check-list of mosses of East Europe and North Asia // *Arctoa*. — 2007. — Vol. 15. — Pp. 1–130.
210. Ilstedt, U. The effect of afforestation on water infiltration in the tropics: a systematic review and meta-analysis / U. Ilstedt, A. Malmer, E. Verbeeten, D. Murdiyarso // *Forest Ecol. Managem.* — 2007. — Vol. 251. — Pp. 45–51.
211. Jackson, R.B. The Ecology of soil carbon: pools, Victims and biotic and abiotic Gils / R.B. Jackson, K. Lajtha, S.E. Crow, W. Hockaday, A.C. Finzi, J.N. Griffin // *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*. — 2017. — Vol. 48. — Pp. 419–445.
212. Janssens, I.A. Reduction of Forest soil Respiration in Response to Nitrogen Deposition / I.A. Janssens, W. Dieleman, S. Luysarert, J.A. Subke, M. Reichstein, D. Baldocchi, B.E. Law, P. Ciais, D. Gianelle, Y. Nouvellon, D. Papale, K. Pilegaard, G.

- Seufert, R. Valentini // *Nature Geoscience*. — 2010. — Vol. 3. — № 5. — Pp. 315–322.
213. Jassal, R. Relationship between soil CO₂ concentrations and forest-floor CO₂ effluxes / R. Jassal, A. Black, M. Novak, K. Morgenstern, Z. Nesic, D. Gaumont-Guay // *Agric for Meteorol.* — 2005. — Vol. 130. — Pp. 176–192.
214. Jennings, B.W. The impact of invasive earthworms on soil respiration and soil carbon within temperate hardwood forests / B.W. Jennings, S.A. Watmough // *Ecosystems*. — 2016. — Vol. 19. — № 5. — Pp. 942–954.
215. Johnson, N.C. Mycorrhizas: symbiotic mediators of rhizosphere and ecosystem processes / N.C. Johnson, C.A. Gehring // *The Rhizosphere*. — Academic Press, 2007. — Pp. 73–100.
216. 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. — № 4. — Pp. 277–304.
217. Karelin, D.V. Contribution analysis of permanent and sporadic controls of CO₂ efflux from chernozems over four seasons / D.V. Karelin, O.E. Sukhoveeva // *Geography, environment, sustainability*. — 2021. — Vol. 15. — № 1. — Pp. 35–45.
218. King, J.S. A multiyear synthesis of soil respiration responses to elevated atmospheric CO₂ from four forest FACE experiments / J.S. King, P.J. Hanson, E. Bernhardt, P. De Angelis, R.J. Norby, K.S. Pregitzer // *Global Change Biology*. — 2004. — Vol. 10. — № 6. — Pp. 1027–1042.
219. Knorr, W. Long term Sensitivity of soil carbon turnover to Warming / W. Knorr, I.C. Prentice, J.I. House, E.A. Holland // *Nature*. — 2005. — Vol. 433. — № 7023. — Pp. 297–301.
220. Kosugi, Y. Spatial and temporal variation in soil respiration in a southeast Asian tropical rainforest / Y. Kosugi, T. Mitani, M. Itoh, S. Noguchi, M. Tani, N. Matsuo, S. Takanashi, S. Ohkubo, A.R. Nik // *Agric. Forest Meteorol.* — 2007. — Vol. 147. — Pp. 35–47.
221. Kurganova, I. Annual and seasonal CO₂ fluxes from Russian southern taiga soils / I. Kurganova, V.L.D. Gerenyu, L. Rozanova, D. Saponov, T. Myakshina, V.

- Kudeyarov // *Tellus B: Chemical and physical meteorology*. — 2003. — Vol. 55. — № 2. — Pp. 338–344.
222. Kurganova, I.N. Updated estimate of carbon balance on Russian territory / I.N. Kurganova, V.N. Kudeyarov, L.D. Gerenyu // *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*. — 2010. — Vol. 62. — № 5. — Pp. 497–505.
223. Kurganova, I.N. CO₂ emission from soils of various ecosystems of the Southern Taiga Zone: Data analysis of continuous 12-year monitoring / I.N. Kurganova, V.O. Lopes de Gerenyu, T.N. Myakshina, D.V. Sapronov, V.N. Kudeyarov // *Doklady Biological Sciences*. — 2011. — Vol. 436. — № 1. — Pp. 56–58.
224. Kurganova, I. Carbon cost of Agricultural collapse in Russia / I. Kurganova, V. Lopes de Gerenyu, J. Six, Y. Kuzyakov // *Global Change Biology*. — 2014. — Vol. 20, № 3. — Pp. 938–947.
225. Kurganova, I.N. Analysis of the long-term soil respiration dynamics in the forest and meadow cenoses of the Prioksko-terrasny biosphere reserve in the perspective of current climate trends / I.N. Kurganova, V.O. Lopes de Gerenyu, D.A. Khoroshaev, T.N. Myakshina, D.V. Sapronov, V.A. Zhmurin, V.N. Kudeyarov // *Eurasian Soil Science*. — 2020. — Vol. 53. — № 10. — Pp. 1421–1436.
226. Kurganova, I. Temperature sensitivity of soil respiration in two temperate forest ecosystems: the synthesis of a 24-year continuous observation / I. Kurganova, V. Lopes de Gerenyu, D. Khoroshaev, T. Myakshina, D. Sapronov // *Forests*. — 2022. — Vol. 13. — № 9. — Pp. 1374.
227. Kuzyakov Y. Review: Factors affecting rhizosphere priming effects // *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. — 2002. — Vol. 165. — № 4. — Pp. 382–396.
228. Kuzyakov, Y. Root and rhizomicrobial respiration: A review of approaches to estimate respiration by autotrophic and heterotrophic organisms in soil / Y. Kuzyakov, A.A. Larionova // *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. — 2005. — Vol. 168. — № 4. — Pp. 503–520.
229. Lal, R. Carbon sequestration // *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*. — 2008. — Vol. 363. — № 1492. — Pp. 1–20.

230. Langeveld, J. Estimating dissolved carbon concentrations in global soils: a global database and model / J. Langeveld, A.F. Bouwman, W.J. van Hoek, L. Vilmin, A.H. Beusen, J.M. Mogollón, J.J. Middelburg // *SN Applied Sciences*. — 2020. — Vol. 2. — № 10. — Pp. 1626.
231. Leonard, L.T. Effect of elevation, season and accelerated snowmelt on biogeochemical processes during isolated conifer needle litter decomposition / L.T. Leonard, E.L. Brodie, K.H. Williams, J.O. Sharp // *PeerJ*. — 2021. — Vol. 9. — Pp. e11926.
232. Lorenz, K. Carbon sequestration in forest ecosystems. — 2010. — Pp. 23–110.
233. Marschner, B. Controls of bioavailability and biodegradability of dissolved organic matter in soils / B. Marschner, K. Kalbitz // *Geoderma*. — 2003. — Vol. 113. — № 3-4. — Pp. 211–235.
234. 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*. — 2020. — Vol. 466. — Pp. 118127.
235. Methods for integrated monitoring in the Nordic countries. — Nordic Council of Ministers: Nord, 1989. — Vol. 68. — 280 p.
236. Michaelowa, A. Additionality revisited: guarding the integrity of market mechanisms under the Paris Agreement / A. Michaelowa, L. Hermwille, W. Obergassel, S. Butzengeiger // *Climate Policy*. — 2019. — Vol. 19. — № 10. — Pp. 1211–1224.
237. Miltner, A. SOM genesis: microbial biomass as a significant source / A. Miltner, P. Bombach, B. Schmidt-Brücken, M. Kästner // *Biogeochemistry*. — 2012. — Vol. 111, № 1. — Pp. 41–55.
238. Michel A. Forest Condition in Europe: The 2025 Assessment. ICP Forests Technical Report under the UNECE Convention on Long-range Transboundary Air Pollution (Air Convention) / A. Michel, K. Hagggenmüller, T. Kirchner, A.-K. Prescher, K. Schwärzel, editors. — Eberswalde: Thünen Institute, 2025. — Pp. 30–39.

239. Mueller, C.W. Soil aggregate destruction by ultrasonication increases soil organic matter mineralization and mobility / C.W. Mueller, S. Schlund, J. Prietzel, I. Kögel-Knabner, M. Gutsch // *Soil Sci. Soc. Am. J.* — 2012. — Vol. 76. — Pp. 1634–1643.
240. 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 Biol.* — 2021. — Vol. 27. — Pp. 1083–1096.
241. Neilson, J.W. Soil respiration as an index of soil aeration / J.W. Neilson, I.L. Pepper // *Soil Science Society of America Journal.* — 1990. — Vol. 54. — № 2. — Pp. 428–432.
242. Nieder, R. Carbon and Nitrogen in the Terrestrial / R. Nieder, D.K. Benbi // Springer, 2008. — Pp. 235–305.
243. Novák, J. Quantity and quality of litterfall in young oak stands / J. Novák, D. Dušek, M. Slodičák // *Journal of Forest Science.* — 2014. — Vol. 60. — № 6. — Pp. 219–225.
244. Osono, T. Accumulation and release of nitrogen and phosphorus in relation to lignin decomposition in leaf litter of 14 tree species / T. Osono, H. Takeda // *Ecological Research.* — 2004. — Vol. 19. — № 6. — Pp. 593–602.
245. Pan, Y. Study on dissolved organic carbon in precipitation in Northern China / Y. Pan, Y. Wang, J. Xin, G. Tang, T. Song, Y. Wang, F. Wu // *Atmosph. Environ.* — 2010. — Vol. 44. — Pp. 2350–2357.
246. Panikov, N.S. The dynamics of gas exchange between soil and atmosphere in relation to plant-microbe interactions: fluxes measuring and modelling / N.S. Panikov, A.J. Gorbenko // *Ecological Bulletins.* — 1992. — Pp. 53–61.
247. Panosso, A.R. Spatial and temporal variability of soil CO₂ emission in a sugarcane area under green and slash-and-burn managements / A.R. Panosso, J. Marques Jr., G.T. Pereira, N. La Scala Jr. // *Soil Tillage Res.* — 2009. — Vol. 105. — Pp. 275–282.

248. Paul, E.A. The nature and dynamics of soil organic matter: Plant inputs, microbial transformations, and organic matter stabilization // *Soil Biology and Biochemistry*. — 2016. — Vol. 98. — Pp. 109–126.
249. Peng Y. Forest management and soil respiration: Implications for carbon sequestration / Y. Peng, S.C. Thomas, D. Tian // *Environmental Reviews*. — 2008. — Vol. 16. — Pp. 93–111.
250. Post, W.M. Soil carbon sequestration and land-use change: processes and potential / W.M. Post, K.C. Kwon // *Global change biology*. — 2000. — Vol. 6. — № 3. — Pp. 317–327.
251. Prescott, C.E. Do rates of decomposition and nutrient release in decomposing litter regulate plant nutrient supply in terrestrial ecosystems? // *Oecologia*. — 2002. — Vol. 133. — № 3. — Pp. 241–250.
252. R Core Team. *A Language and Environment for Statistical Computing*. — Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2022. — URL: <https://www.r-project.org/> (дата обращения: 01.02.2025).
253. Rahmat, A. Runoff characteristics of forest watersheds under different forest managements / A. Rahmat, K. Noda, T. Onishi, M. Senge // *Reviews in Agricultural Science*. — 2018. — Vol. 6. — Pp. 119–133.
254. Raich, J.W. Global patterns of carbon dioxide emissions from soils / J.W. Raich, C.S. Potter // *Global biogeochemical cycles*. — 1995. — Vol. 9. — № 1. — Pp. 23–36.
255. Raich, J.W. Vegetation and soil respiration: correlations and controls / J.W. Raich, A. Tufekciogul // *Biogeochemistry*. — 2000. — Vol. 48. — № 1. — Pp. 71–90.
256. Reinsch, S. Aboveground plant biomass / S. Reinsch, A. Linstädter, L. Berauer, B. Kröel-Dulay, G. Schmidt, E. Stuart-Haëntjens, K.I.K. // *The handbook for standardised field and laboratory measurements in terrestrial climate-change experiments and observational studies (ClimEx)* / Ed. A.H. Halbritter. — 2020. — Pp. 46–84.
257. Reichstein, M. Modeling temporal and large-scale spatial variability of soil respiration from soil water availability, temperature and vegetation productivity

- indices / M. Reichstein, A. Rey, A. Freibauer, J. Tenhunen, R. Valentini, J. Banza, D. Yakir // *Global biogeochemical cycles*. — 2003. — Vol. 17. — № 4. — 3977 p.
258. Rodeghiero, M. Main determinants of forest soil respiration along an elevation/temperature gradient in the Italian Alps / M. Rodeghiero, A. Cescatti // *Glob Change Biol*. — 2005. — Vol. 11. — № 7. — Pp. 1024.
259. Roig-Planasdemunt, M. Seasonal and storm flow dynamics of dissolved organic carbon in a Mediterranean mountain catchment (Vallcebre, eastern Pyrenees) / M. Roig-Planasdemunt, P. Llorens, J. Latron // *Hydrological Sci. J.* — 2017. — Vol. 62. — Pp. 50–63.
260. Salako, F.K. Litter and biomass production from planted and natural fallows on a degraded soil in southwestern Nigeria / F.K. Salako, G. Tian // *Agroforestry systems*. — 2001. — Vol. 51. — № 3. — Pp. 239–251.
261. Sales, M.C.G. Litter input in cerrado, cerradão and forest environments in Amazon, Brazil / M.C.G. Sales, M.C.C. Campos, T.S. Martins, E.G. de Brito Filho, E.N. Pinheiro, J.M. da Cunha, F.G. de Souza // *Agrária-Revista Brasileira de Ciências Agrárias*. — 2020. — Vol. 15. — № 2. — Pp. 1–7.
262. Scherer-Lorenzen, M. Forest diversity and function: temperate and boreal systems / M. Scherer-Lorenzen, E.D. Schulze. — Springer Science & Business Media, 2005. — Vol. 176. — Pp. 7–145.
263. Schlesinger, W.H. Soil respiration and global carbon cycle / W.H. Schlesinger, J.A. Andrews // *Biogeochemistry*. — 2000. — Vol. 48. — № 1. — Pp. 7–20.
264. Shi, P. Soil respiration and response of carbon source changes to vegetation restoration in the Loess Plateau, China / P. Shi, Y. Qin, Q. Liu, T. Zhu, Z. Li, P. Li, F. Wang // *Science of the Total Environment*. — 2020. — Vol. 707. — Pp. 135507.
265. Shorohova, E. Stand and landscape scale variability in the amount and diversity of coarse woody debris in primeval European boreal forests / E. Shorohova, E. Kapitsa // *Forest Ecol. Manag.* — 2015. — Vol. 356. — Pp. 273–284.
266. Smith, D.L. Vegetation-mediated changes in microclimate reduce soil respiration as woodlands expand into grasslands / D.L. Smith, L. Johnson // *Ecology*. — 2004. — Vol. 85. — № 12. — Pp. 3348–3361.

267. Sollins, P. Organic C and N stabilization in a forest soil: evidence from sequential density fractionation / P. Sollins, C. Swanston, M. Kleber, T. Filley, M. Kramer, S. Crow, R. Bowden // *Soil Biology and Biochemistry*. — 2006. — Vol. 38. — № 11. — Pp. 3313–3324.
268. Sprugel, D.G. Density, biomass, productivity, and nutrient-cycling changes during stand development in wave-regenerated balsam fir forests // *Ecological Monographs*. — 1984. — Vol. 54. — № 2. — Pp. 165–186.
269. Špulák, O. Topsoil moisture depletion and recharge below young Norway spruce, white birch, and treeless gaps at a mountain–summit site / O. Špulák, F. Šach, D. Kacálek // *Forests*. — 2021. — Vol. 12. — Pp. 828.
270. Sun, L. Root exudation as a major competitive fine-root functional trait of 18 coexisting species in a subtropical forest / L. Sun, M. Ataka, M. Han, Y. Han, D. Gan, T. Xu, Y. Guo, B. Zhu // *New Phytol.* — 2021. — Vol. 229. — Pp. 259–271.
271. Teklay, T. Soil respiration characteristics of tropical soils from agricultural and forestry land-uses at Wondo Genet (Ethiopia) in response to C, N and P amendments / T. Teklay, A. Nordgren, A. Malmer // *Soil Biology and Biochemistry*. — 2006. — Vol. 38. — № 1. — Pp. 125–133.
272. Thimonier, A. Total deposition of nitrogen in Swiss forests: Comparison of assessment methods and evaluation of changes over two decades / A. Thimonier, Z. Kosonen, S. Braun, B. Rihm, P. Schleppi, M. Schmitt, L. Thöni // *Atmospheric Environment*. — 2019. — Vol. 198. — Pp. 335–350.
273. The Working Guidance for Carbon Dioxide Peaking and Carbon Neutrality in Full and Faithful Implementation of the New Development Philosophy. — 2021. — URL: https://en.ndrc.gov.cn/policies/202110/t20211024_1300725.html (дата обращения: 02.02.2026).
274. Tikhonova, E.V. Functional organization and species diversity of postagrogenic phytocenoses during natural reforestation depending on soil properties / E.V. Tikhonova, A.V. Titovets, D.N. Tikhonov, O.V. Shopina, I.N. Semenov // *Rastitel'nost' Rossii*. — 2025. — Vol. 52. — Pp. 38–71.

275. Toky, O.P. Secondary succession following slash and burn agriculture in North-Eastern India: I. biomass, litterfall and productivity / O.P. Toky, P.S. Ramakrishnan // *The Journal of Ecology*. — 1983. — Pp. 735–745.
276. Tong, D. How do soil microbes exert impact on soil respiration and its temperature sensitivity? / D. Tong, Z. Li, H. Xiao, X. Nie, C. Liu, M. Zhou // *Environmental Microbiology*. — 2021. — Vol. 23. — № 6. — Pp. 3048–3058.
277. Tsiko, C.T. Measuring forest floor and canopy interception in a savannah ecosystem / C.T. Tsiko, H. Makurira, A.M.J. Gerrits, H.H.G. Savenije // *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*. — 2012. — Vol. 47. — Pp. 122–127.
278. Tufekcioglu, A. Soil respiration within riparian buffers and adjacent crop fields / A. Tufekcioglu, J.W. Raich, T.M. Isenhardt, R.C. Schultz // *Plant and soil*. — 2001. — Vol. 229. — № 1. — Pp. 117–124.
279. 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. Neiryneck, P. Roskams, M. Hens // *Atmosph. Environ.* — 2014. — Vol. 83. — Pp. 155–165.
280. Vesterdal, L. Soil respiration and rates of soil carbon turnover differ among six common European tree species / L. Vesterdal, B. Elberling, J.R. Christiansen, I. Callesen, I.K. Schmidt // *Forest Ecology and Management*. — 2012. — Vol. 264. — Pp. 185–196.
281. Vicena, J. The effect of microbial diversity and biomass on microbial respiration in two soils along the soil chronosequence / J. Vicena, M.M. Ardestani, P. Baldrian, J. Frouz // *Microorganisms*. — 2022. — Vol. 10. — № 10. — Pp. 1920.
282. Walsh, C.J. Stormwater drainage pipes as a threat to a stream-dwelling amphipod of conservation significance, *Austrogammarus australis*, in southeastern Australia / C.J. Walsh, P.J. Papas, D. Crowther, P.T. Sim, J. Yoo // *Biodiversity & Conservation*. — 2004. — Vol. 13. — № 4. — Pp. 781–793.
283. Wei-dong, F.A.N.G. Soil characteristics and water conservation of different forest types in Changbai Mountain / F.A.N.G. Wei-dong, K.A.N.G. Xin-gang, Z.H.A.O.

- Hao-yan, H.U.A.N.G. Xin-feng, G.O.N.G. Zhi-wen, G.A.O. Yan, F.E.N.G. Qi-xiang // *Journal of Beijing Forestry University*. — 2011. — Vol. 33. — № 4. — Pp. 40–47.
284. Wiaux, F. Vertical partitioning and controlling factors of gradient-based soil carbon dioxide fluxes in two contrasted soil profiles along a loamy hillslope / F. Wiaux, M. Vanclooster, K.V. Oost // *Biogeosciences*. — 2015. — Vol. 12. — Pp. 4637–4649.
285. Willey, J.D. Rainwater dissolved organic carbon: concentrations and global flux / J.D. Willey, R.J. Kieber, M.S. Eyman, Jr G.B. Avery // *Global Biogeochem. Cycles*. — 2000. — Vol. 14. — Pp. 139–148.
286. WRB. World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. — 4th ed. — Vienna: IUSS, 2022. — 236 p.
287. Xiao, H.B. The regulatory effects of biotic and abiotic factors on soil respiration under different land-use types / H.B. Xiao, Z.H. Shi, Z.W. Li, J. Chen, B. Huang, Z.J. Yue, Y.M. Zhan // *Ecological Indicators*. — 2021. — Vol. 127. — Pp. 107787.
288. Xu, M. Contribution of soil respiration to the global carbon equation / M. Xu, H. Shang // *Journal of Plant Physiology*. — 2016. — Vol. 203. — Pp. 16–28.
289. Yang, Y.S. A review of tree root respiration: significance and methodologies / Y.S. Yang, B. Dong, J.S. Xie, G.S. Chen, L. Li, D.X. Li, Z.Li // *Chinese Journal of Plant Ecology*. — 2004. — Vol. 28. — № 3. — Pp. 426–434.
290. Yang C. Soil aggregates regulate the impact of soil bacterial and fungal communities on soil respiration / C. Yang, N. Liu, Y. Zhang // *Geoderma*. — 2019. — Vol. 337. — Pp. 444–452.
291. Zhao X. Changes in soil physico-chemical and microbiological properties during natural succession on abandoned farmland in the Loess Plateau / X. Zhao, P. Liu, Y. Feng, W. Zhang, B. Njoroge, F. Long, X. Liu // *Environmental Earth Sciences*. — 2011. — Vol. 62. — № 5. — Pp. 915–925.
292. Zhang, Y. Topography modifies the effect of land-use change on soil respiration: A meta-analysis / Y. Zhang, J. Zou, S. Dang, B. Osborne, Y. Ren, X. Ju // *Ecosphere*. — 2021. — Vol. 12. — № 12. — Pp. e03845.

293. Zhang, J. Soil and climate determine differential responses of soil respiration to nitrogen and acid deposition along a forest transect / J. Zhang, H. Yang, J. Wang, D. Tian, Y. Li, N. He, S. Niu // *European Journal of Soil Biology*. — 2019. — Vol. 93. — Pp. 103097.
294. Zhang, Y. Effect of soil microorganisms and labile C availability on soil respiration in response to litter inputs in forest ecosystems: A meta-analysis / Y. Zhang, J. Zou, D. Meng, S. Dang, J. Zhou, B. Osborne, K. Yu // *Ecology and Evolution*. — 2020. — Vol. 10. — № 24. — Pp. 13602–13612.
295. Zhu, H. Ecohydrological effects of litter cover on the hillslope-scale infiltration-runoff patterns for layered soil in forest ecosystem / H. Zhu, G. Wang, A. Yinglan, T. Liu // *Ecological Engineering*. — 2020. — Vol. 155. — Pp. 105930.
296. Zhuang, W. Litter inputs exert greater influence over soil respiration and its temperature sensitivity than roots in a coniferous forest in north-south transition zone / W. Zhuang, M. Liu, Y. Wu, J. Ma, Y. Zhang, L. Su, S. Fu // *Science of the Total Environment*. — 2023. — Vol. 886. — Pp. 164009.
297. Zomer, R.J. Global Tree Cover and Biomass Carbon on Agricultural Land: The contribution of agroforestry to global and national carbon budgets / R.J. Zomer, H. Neufeldt, J. Xu, A. Ahrends, D. Bossio, A. Trabucco, M. Wang // *Scientific reports*. — 2016. — Vol. 6. — № 1. — Pp. 29987.

Приложение А

Таблица А1 – Гранулометрический состав почв исследуемых БГЦ

Тип БГЦ	Горизонт почвы	Массовая доля механических фракций, соответствующих размеров в мм, %									
		1,00– 0,50	0,50– 0,25	0,25– 0,10	0,10– 0,05	0,05– 0,01	0,010– 0,002	0,002– 0,001	менее 0,001	Сумма частиц	
										более 0,01	менее 0,01
Луг	О	1,9±0,5	2,2±0,3	5,4±0,7	20,9±3,1	54,5±3,5	10,4±1,8	2,7±0,3	2,5±0,5	84,3±1,2	15,7±1,2
	АУра	2,1±0,5	1,5±0,2	4,2±0,5	17,7±1,8	58,0±1,3	11,8±1,9	3,1±0,8	3,1±0,4	82,9±1,7	17,1±1,7
	АЕLpa,f	2,4±0,5	1,2±0,2	3,9±0,7	18,2±2,9	57,9±2,3	12,9±2,2	1,1±0,2	3,3±0,3	82,7±2,2	17,3±2,2
	ELf	1,7±0,3	1,3±0,4	3,9±0,9	18±1	60,7±1,2	10,7±1,3	1,6±0,5	2,6±0,7	85,1±2,3	14,9±2,3
	BTf,ca	2,9±1	4,3±1,4	12,5±2,5	13,9±2,3	47,1±4,7	11,3±3	3,4±0,6	4,5±0,7	80,8±3,3	19,2±3,3
Березняк злаковый	О	2,3±0,3	1,5±0,2	4,1±0,6	19,0±1,4	57,8±2	9,4±0,7	1,8±0,5	4,3±0,4	84,6±0,7	15,4±0,7
	АУра	2,5±0,4	1,7±0,2	4,3±0,6	17,5±0,5	60,5±1,7	7,3±0,9	2,6±0,5	3,5±0,3	86,6±0,8	13,4±0,8
	АЕLpa,f	2,7±0,5	1,8±0,3	4,4±0,6	17,7±1	60,7±1,6	8,3±0,7	1,7±0,4	2,9±0,2	87,2±0,8	12,8±0,8
	ELf	1,8±0,4	1,7±0,2	3,9±0,5	17,6±1,7	65,7±1,7	6,0±0,8	1,5±0,6	1,9±0,2	90,5±1	9,5±1
	BTf,ca	4,1±1,2	6,0±1,4	15,3±3,3	14,8±1,9	36,2±5,2	9,7±1,8	6,9±1,2	7,0±1,0	76,4±2,1	23,6±2,1
Березняк высокотравный	О	3,1±0,4	2,3±0,1	10,2±0,3	21,8±1,1	47,2±0,8	10,9±0,4	1,0±0,3	3,6±0,5	84,6±0,8	15,4±0,8
	АУра	2,9±0,4	2,8±0,2	10,9±0,3	20,8±0,9	48,4±0,8	9,2±0,6	1,2±0,3	3,8±0,3	85,8±1	14,2±1
	АЕLpa,f	2,2±0,2	2,5±0,2	10,9±0,5	20,1±1	50,4±0,7	9,4±0,5	1,5±0,3	3,0±0,3	86,1±0,6	13,9±0,6
	ELf	2,1±0,3	2,6±0,2	11,3±0,5	21,3±0,6	52,0±1,8	6,6±0,8	1,4±0,3	2,6±0,7	89,4±1,3	10,6±1,3
	BTf,ca	3,5±1,2	4,6±1,4	11,1±3,3	18,7±1	45,2±4,7	7,1±0,4	3,5±0,5	6,3±0,8	83,1±0,6	16,9±0,6

Таблица А2 – Физические и химические показатели почв: запас подстилки/плотность минеральных горизонтов, рН_{вод}, содержание С, N, P, Ca, Mg, K.

Тип БГЦ	Горизонт	Запас, кг / м ² Плотность, г/см ³	рН _{вод}	С, %	N,%	P, мг кг ⁻¹	Ca, мг кг ⁻¹	Mg, мг кг ⁻¹	K, мг кг ⁻¹
Луг	О	0,82±0,16	6,21-0,07	41,43±0,97	1,43±0,03	399,6±10,1	5716±397	1988,1±59,1	2209,9±348,5
	AУpa ₁	0,85±0,03	6,09-0,06	3,05±0,17	0,28±0,02	98±3,5	1847±423	81,2±1,9	160,1±18,1
	AУpa ₂	1,14±0,06	6,13-0,1	1,79±0,08	0,17±0,02	76±3,6	1282±505	53,6±1,2	136,6±16
	AELpa,f	1,35±0,04	6,31-0,1	1,43±0,15	0,11±0,01	67,3±2,8	1295±583	45,2±1,2	107,6±11,3
	ELf	1,52±0,07	6,62-0,08	0,32±0,03	0,03±0,01	65,1±3,1	889±363	50,9±7,1	99,7±23,2
	BTf,ca	1,61±0,04	6,93-0,09	0,16±0,02	0,02±0,01	37,3±2,3	1958±538	98,7±2,3	476,8±49,4
Березняк злаковый	О	0,54±0,10	5,73-0,04	44,93±0,28	1,22±0,03	358,9±12	7857±157	2778,5±134	1245,4±37.
	AУpa ₁	1,07±0,03	5,52-0,04	2,23±0,04	0,16±0,01	36,1±1,9	1089±40	82,1±4,4	104,7±7,5
	AУpa ₂	1,32±0,03	5,8-0,04	1,4±0,05	0,11±0,01	32,1±1,8	1072±55	51,7±3,4	78,5±8
	AELpa,f	1,43±0,05	5,99-0,04	1,09±0,04	0,09±0,01	32,5±1,8	1017±41	43,3±3,7	67,4±8,2
	ELf	1,57±0,09	6,1-0,04	0,39±0,02	0,03±0,01	53,6±3,7	672±75	36,8±2,8	59,4±7,4
	BTf,ca	1,85±0,06	6,25-0,04	0,23±0,01	0,03±0,01	34±2,8	2624±446	73±3,6	243,2±20,4
Березняк высокотравный	О	0,53±0,11	5,92-0,02	45,21±0,26	1,14±0,04	390,4±44,1	7159±198	1605±102,3	2068,3±268
	AУpa ₁	1,1±0,04	5,55-0,05	2,63±0,05	0,19±0,01	122,4±11	1406±255	238±32,6	154,5±44,7
	AУpa ₂	1,29±0,03	5,64-0,06	1,52±0,06	0,12±0,01	96,1±21,5	704±61	143,2±52,3	46,4±7,4
	AELpa,f	1,55±0,06	5,64-0,06	1,2±0,02	0,1±0,01	102±16,8	603±57	131,2±59,6	40,3±9,5
	ELf	1,57±0,15	5,75-0,05	0,54±0,02	0,04±0,01	126,7±35,3	406±39	136,5±65	39,5±12,1
	BTf,ca	1,72±0,09	5,79-0,06	0,21±0,01	0,02±0,01	60,6±11,4	1089±71	509,3±198	105,3±23

Таблица А3 – Валовый состав почвообразующих пород

Тип БГЦ	Содержание элементов, %							
	К	Na	Ca	Mg	Fe	Mn	Al	P
Луг	1,48±0,07	1,23±0,19	0,47±0,01	0,44±0,01	3,31±0,31	0,05±0,01	7,07±0,12	0,03±0,01
Березняк злаковый	1,60±0,11	1,11±0,09	1,51±0,54	0,89±0,28	2,64±0,19	0,04±0,01	7,37±1,23	0,03±0,01
Березняк высокотравный	1,39±0,08	1,24±0,09	0,53±0,14	0,41±0,06	2,81±0,2	0,04±0,01	11,11±0,9	0,02±0,01

Приложение Б

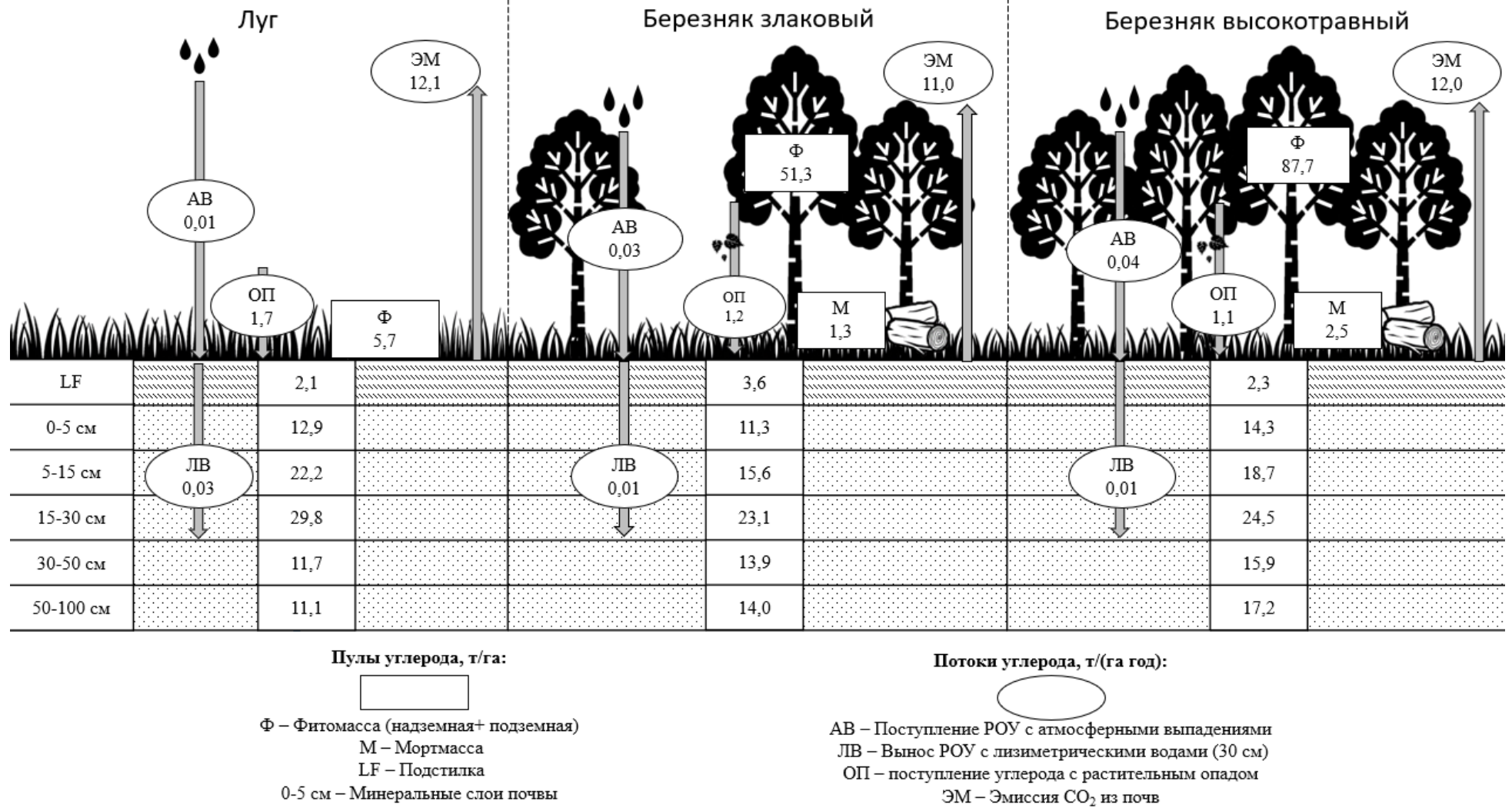


Рисунок Б1 Пулы и потоки углерода

Приложение В

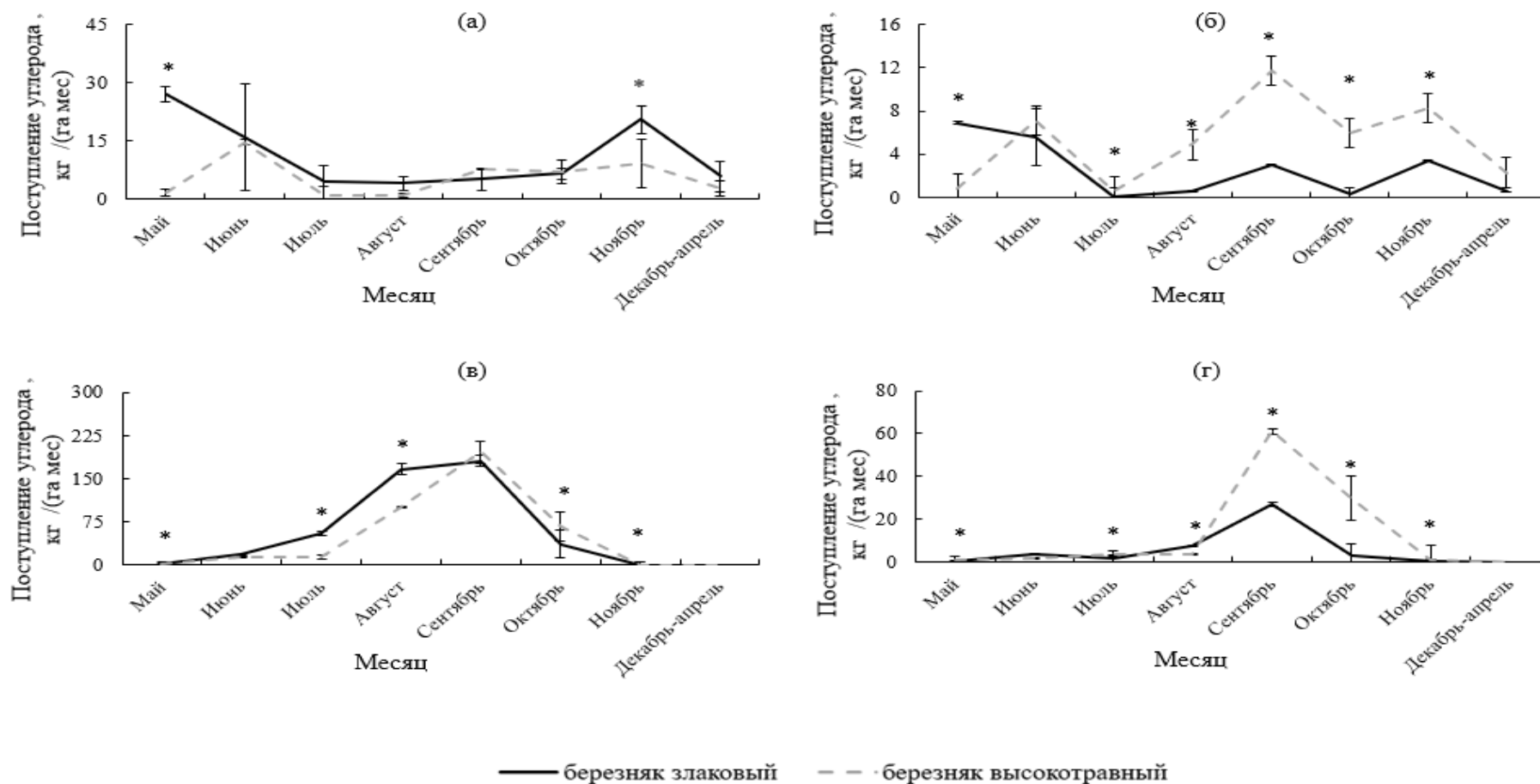


Рисунок В1 Месячная динамика поступления углерода фракциями древесно-кустарникового опада: а – веток березы, б – веток ивы, в – листьев березы, г – листьев ивы.

* – $p < 0,05$ при сравнении между березняком злаковым и березняком высокотравным.

Приложение Г

Таблица Г1 – Механизмы влияния растительности, определяющие различия запасов почвенного углерода между лесными и луговым БГЦ

Информативные показатели	Описание механизма
Поступление углерода с растительным опадом и его качественные характеристики	
<p>Качество опада:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Концентрация азота в растительном опаде • Отношение C/N в растительном опаде • Концентрация азота в опаде напочвенного покрова • Отношение C/N в опаде напочвенного покрова <p>Количество опада:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Поступление углерода с опадом напочвенного покрова • Поступление углерода с растительным опадом 	<p>Тип растительности определяет формирование опада разного качества (отношение C/N, концентрация N). В мелколиственных БГЦ формируется опад более низкого качества, чем в луговом БГЦ, из-за наличия неактивной фракции (ветки, кора) и более широкого C/N в листе по сравнению с опадом напочвенного покрова. Различия в поступлении некативной фракции опада объясняет различия в запасах углерода подстилки и слоя 0-5 между мелколиственными БГЦ.</p> <p><u>Подстилка:</u> Чем уже отношение C/N и выше концентрация N в опаде, т.е. чем выше качество опада, тем быстрее происходит его разложение, что не способствует накоплению углерода в подстилке. Поэтому запас углерода в подстилке мелколиственных БГЦ выше, чем в луговом БГЦ, а в березняке злаковом выше, чем березняке высокотравном.</p> <p><u>Минеральные горизонты 0-30 см:</u> Углерод опада, разлагаясь в подстилке, мигрирует в нижележащие горизонты. Большая часть опада на изучаемых БГЦ высокого качества, органическое вещество которого за счет повышенной скорости разложения проникает в слой в слой 0-30 см. Чем больше количество легкоразлагаемого опада, тем больше пул углерода минеральном слое почв. На лугу формируется более качественный опад в большем количестве, что ускоряет миграцию углерода в слой 5–30 см по сравнению с мелколиственными БГЦ.</p>

Продолжение таблицы Г1

Поступление РОУ с атмосферными выпадениями	
Поступление РОУ <ul style="list-style-type: none"> • за вегетационный период • в мае • в июле 	<p>Атмосферные выпадения, проходя через древесный полог, обогащаются растворенными органическими веществами, за счет выделения растительными тканями органических веществ и их последующего вымывания (выщелачивания), поэтому поступление углерода с атмосферными выпадениями в мелколиственных БГЦ выше, чем на луговом БГЦ.</p> <p><u>Подстилка:</u> Поступление РОУ может способствовать сохранению запасов углерода почвы из-за наличия ароматических и гидрофобных структур, оказывающих ингибирующее действие на активность ферментов, участвующих в биодegradации ПОУ (Marschner, Kalbitz, 2003). Поэтому более высокое поступление РОУ в мелколиственных БГЦ, чем в луговом БГЦ способствует сохранению углерода подстилки.</p> <p><u>Минеральные горизонты 0-30 см:</u> Больше поступление углерода с атмосферными выпадениями замедляет процесс разложения подстилки, поэтому миграция углерода в минеральные слои снижается.</p>
Почвенное дыхание	
Почвенное дыхание <ul style="list-style-type: none"> • в сентябре • в октябре 	<p>Тип растительности определяет качественные и количественные показатели опада, от которых зависит его деструкция почвенной биотой. Почвенное дыхание, как показатель, связанный с активностью гетеротрофов, отражает процессы разложения органического вещества почв. В мелколиственных БГЦ опада меньше, и он хуже по качеству, чем в луговом. Поэтому эмиссия в сентябре и октябре (период массового листопада и его первичного разложения) в луговом БГЦ выше.</p> <p><u>Подстилка:</u> В мелколиственных БГЦ за счёт более низких качественных и количественных характеристик опада эмиссия CO₂ в осенние месяцы (период массового листопада и его первичного разложения) меньше по сравнению с лугом, что объясняет большие запасы углерода подстилки в березняках по сравнению с лугом. Для луга высокая эмиссия по сравнению с мелколиственными БГЦ отражает более активное разложение подстилки и, следовательно, миграцию углерода из подстилки в старопашотный слой</p> <p><u>Минеральные горизонты 5-30 см:</u> Чем выше эмиссия, тем быстрее происходит физическое и химическое разложение опада и, следовательно, миграция углерода из подстилки в старопашотный слой. Для луга высокая эмиссия по сравнению с мелколиственными БГЦ отражает более активное разложение подстилки и, следовательно, миграцию углерода из подстилки в старопашотный слой</p>

Продолжение таблицы Г1

Вынос РОУ с лизимитрическими водами	
Вынос РОУ с лизимитрическими водами в сентябре	<p>Влияние растительности на миграцию РОУ из подстилки обусловлено качеством опада. Опад более высокого качества в луговом БГЦ, разлагается быстрее, обогащая почвенный раствор органическими соединениями больше, чем опад мелколиственных БГЦ. Такие различия проявляются в сентябре – в пик опада, в период его первичной деструкции.</p> <p><u>Подстилка:</u> Связь между миграцией РОУ с лизимитрическими водами в сентябре и запасами углерода подстилки объясняется качеством опада и процессами вымывания РОУ при разложении подстилки. Пик поступления опада приходится на сентябрь. В луговом БГЦ горизонт подстилки сформирован опадом высокого качества с быстрым оборотом и, как следствие, запасы углерода подстилки в этом типе БГЦ меньше, чем в березняках, а концентрации и миграция РОУ с лизимитрическими водами соответственно больше.</p>