

DOI 10.31509/2658-607x-202252-113  
УДК 574.42 + 57.055

# КАЧЕСТВО ДРЕВЕСНОГО ОПАДА КАК ИНФОРМАТИВНЫЙ ИНДИКАТОР ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ КЛАССИФИКАЦИИ ЛЕСОВ

© 2022 г.

Е. В. Басова<sup>1</sup>, Н. В. Лукина<sup>1</sup>, А. И. Кузнецова<sup>1</sup>, А. В. Горнов<sup>1</sup>,  
Н. Е. Шевченко<sup>1</sup>, Е. В. Тихонова<sup>1</sup>, А. П. Гераськина<sup>1</sup>, Т. Ю. Браславская<sup>1</sup>,  
Д. Н. Тебенькова<sup>1</sup>, Д. Л. Луговая<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН

Россия, 117997 Москва, ул. Профсоюзная, 84/32, стр. 14

<sup>2</sup> Всемирный фонд дикой природы

Россия, 109240 г. Москва, ул. Николаямская, д. 19, стр. 3

E-mail: lenabasova7@gmail.com

Поступила в редакцию: 01.09.2022

После рецензирования: 17.10.2022

Принята к печати: 18.11.2022

**Актуальность и цели.** В условиях глобального изменения климата климаторегулирующая функция лесов заслуживает особого внимания. До сих пор не существует функциональной классификации лесов по эффективности выполнения ими функции аккумуляции углерода. Цель данной статьи — обсудить подход к такой классификации, основанный на оценке качества древесного опада.

**Объекты и методы.** Для апробации подхода к выделению функциональных типов лесов (ФТЛ) на основе качества древесного опада с учетом позиции в ландшафте и механического состава почвообразующих пород использованы данные по почвам и растительности, полученные на 23 объектах, функционирующих в подзоне хвойно-широколиственных лесов европейской части России на территории Брянского полесья и Москворецко-Окской равнины. Для косвенной (по экологической шкале Э. Ландольта с помощью программы SpeDiv) оценки различий в почвенном богатстве лесов, принадлежащих к разным ФТЛ, проанализирован видовой состав 160 описаний растительности лесов Московской, Брянской, Смоленской, Костромской областей, Краснодарского края и республики Адыгея (Северо-Западный Кавказ).

**Результаты.** Приведены примеры функциональных типов леса (ФТЛ) для хвойно-широколиственных лесов европейской части России. Показаны различия в уровне накопления почвенного углерода между разными ФТЛ, а также дана предварительная оценка влияния позиции в ландшафте и механического состава почв на аккумуляцию углерода в почвах одних и тех же ФТЛ.

**Заключение.** На основе качества опада растений древесного яруса выделено 15 ФТЛ, которые подтверждены примерами на основе геоботанических описаний лесных сообществ, распространенных в зоне хвойно-широколиственных лесов европейской части России и в поясе хвойно-широколиственных лесов Северо-Западного Кавказа. Правомочность выделения ФТЛ по эффективности накопления углерода в почвах на основе качества растительного опада с учетом влияния «внешних факторов» (позиция в ландшафте и механический состав почвообразующих пород) подтверждается данными, полученными на 23 объектах. Оценки запасов углерода в почве, а также почвенного богатства, определенного по экологической шкале, выявили различия между выделенными ФТЛ. Выявлены различия в запасах углерода в лесных экосистемах в одном и том же ФТЛ, формирующихся на суглинистых и супесчаных почвообразующих породах. Подтверждены различия в запасах почвенного углерода в лесах, относящихся к одному ФТЛ, но формирующихся на разных позициях в ландшафте; в транзитных ландшафтах запасы почвенного углерода выше, чем в автономных.

**Ключевые слова:** хвойно-широколиственные леса, функциональная классификация, функциональные типы леса, запасы углерода

Е. В. Басова, Н. В. Лукина, А. И. Кузнецова, А. В. Горнов,  
Н. Е. Шевченко, Е. В. Тихонова, А. П. Гераськина, Т. Ю. Браславская,  
Д. Н. Тебенькова, Д. Л. Луговая

В настоящее время всё больше внимания уделяется экосистемным функциям и услугам лесов. Леса выполняют все четыре категории экосистемных функций/услуг (регулирующие, обеспечивающие, поддерживающие и культурные). В связи с этим становится актуальной разработка новых подходов к классификации лесов, основанных на эффективности выполнения ими различных функций.

В условиях глобальных изменений климата, связанных с увеличением поступления парниковых газов в атмосферу, особого внимания заслуживает климаторегулирующая функция лесов. Леса способны поглощать парниковые газы и накапливать углерод как в биомассе, так и в почве. Ряд исследований показал, что на эффективность выполнения лесами функции аккумуляции углерода, в частности на депонирование углерода в почве, могут оказывать влияние различные природные и антропогенные факторы (Мажитова и др., 2003; Честных и др., 2004; Машика, 2005; Щепашенко и др., 2013; Бобкова и др., 2014; Баева и др., 2017; Телеснина и др., 2017; Бахмет, 2018; Дымов, 2018; Демаков и др., 2018; Честных и др., 2020; Рыжова и др., 2020; Аккумуляция., 2018; Lukina et al., 2020; Kuznetsova et al., 2021). Среди природных факторов можно выделить внутренние и внешние. К внутренним факторам относятся растительность, почвенные микроорганизмы и животные, другая биота; к внешним — абиотические факторы, такие как почвообразующие по-

роды, климат, рельеф. Среди антропогенных факторов важное значение имеют режим лесопользования и землепользования в целом, техногенный фактор, пожары.

Растительность как основной источник поступления органического вещества в почву определяет уровень аккумуляции почвенного органического вещества. На динамику пулов почвенного углерода, обусловленную растительностью, влияют количество и качество опада древесных видов и по отдельности, и совместно (Castellano et al., 2015; Kuznetsova et al., 2021).

Качество опада зависит от видового и возрастного состава растительности, а также стадий онтогенетического развития растений и определяется соотношением элементов питания (азота, фосфора, калия, кальция, магния и др.) и вторичных метаболитов (полифенолов, лигнина, и др.) в опаде, важным показателем является соотношение C/N (Berg, 2020). Качество опада зависит от соотношения между содержанием элементов питания и вторичных метаболитов и регулирует скорость разложения растительных остатков — основного источника питания сапрофагов (Krishna, 2017). По качеству опада можно выделить функциональные типы растений (Cornelissen et al., 2007).

Классификация лесных сообществ по эффективности выполнения ими функции регулирования цикла углерода может основываться на качестве растительного опада (Лукина и др., 2021). В хвойно-широколиственных лесах значительная доля

растительного опада, решающим образом влияющего на накопление почвенного углерода, формируется древесными растениями. Опад низкого качества, то есть с низким содержанием оснований, азота, высокой кислотностью, высоким содержанием лигнина и других вторичных метаболитов, а также широким отношением C/N характерен для хвойных деревьев. Ранее, при сравнении видов хвойных между собой, было отмечено, что опад в сосновых лесах отличается гораздо более широким отношением C/N, чем в еловых (Lukina et al., 2020). В ряде европейских (Lovett et al., 2004; Reich et al., 2005; Oostrа et al., 2006) и североамериканских исследований (Finzi et al., 1998; Neiryneck et al., 2000; Dijkstra, Fitzhugh, 2003; Hagen-Thorn et al., 2004) показаны различия в качестве опада, запасах углерода подстилки и соотношении C/N некоторых широколиственных видов деревьев (*Fraxinus excelsior*, *Fagus orientalis* и родов *Acer* и *Quercus*): ясень и клен объединяются в группу растений с высоким качеством опада, в то время как дуб и бук характеризуются относительно низким содержанием N в опаде, более широким отношением C/N, низкой скоростью разложения.

Цель данной статьи — представить результаты реализации подхода к функциональной классификации хвойно-широколиственных лесов на основе связей между качеством растительного опада и запасами углерода в почвах.

На данном этапе работы необходимо решить следующие задачи:

- определить, какие функциональные типы леса могут быть выделены в зоне хвойно-широколиственных лесов европейской части России на основе качества опада древесных растений;
- выяснить, различаются ли выделенные на основании предложенного подхода функциональные типы лесов по запасам углерода в почвах;
- продемонстрировать влияние почвообразующих пород и рельефа на функцию накопления углерода в почвах лесов, относящихся к одному ФТЛ.

## МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

В анализ включены данные по геоботаническим описаниям лесных сообществ и характеристике почв 23 объектов, представляющих леса, формирующиеся в автономных и транзитных ландшафтах на почвообразующих породах разного механического состава (супесчаных, суглинистых) в подзоне хвойно-широколиственных лесов европейской части России. На суглинистых почвообразующих породах Москворецко-Окской равнины (МО) исследовали дубово-еловые с липой бореально-неморальнотравные леса, на песчаных Брянского полярья (БП) — полидоминантные широколиственные с елью неморальнотравные, сосняки кустарничково-зеленомошные,

осиново-берёзовые неморальные. В Брянском полесье описания сосняков и осиново-берёзовых лесов выполнены как в автономных, так и транзитных ландшафтах.

Описания растительности выполнялись на постоянных пробных площадках размером 20 × 20 м по стандартной методике (Аккумуляция..., 2018). На пробных площадях с помощью почвенного бура отбирались образцы из минеральных горизонтов почв до глубины 50 см либо были заложены почвенные разрезы до глубины 100 см. Образцы подстилки отбирались на площадках 0.25 × 0.25 м в трёхкратной повторности. В лаборатории образцы из минеральных горизонтов были высушены и просеяны через сито 2 мм, химический анализ проводился в образцах фракции менее 2 мм. Образцы подстилки высушивались и взвешивались для определения запаса (Аккумуляция..., 2018). Оценка содержания углерода и азота во всех образцах проводилась на CHN анализаторе (EA 1110 (CHNS-O)).

Косвенная оценка различий в почвенном богатстве лесов, принадлежащих к разным ФТЛ, проводилась по экологической шкале Э. Ландольта с помощью программы *SpeDiv*; проанализирован видовой состав 160 описаний растительности лесов Московской, Брянской, Смоленской, Костромской областей, Краснодарского края и республики Адыгея (Северо-Западный Кавказ).

Инвентаризация лесных сообществ в пределах выделенных ФТЛ приведе-

на по материалам сайта Ценофонд лесов Европейской России, для Северного Кавказа — по материалам оригинальной базы данных геоботанических описаний лесных сообществ Северо-Западного Кавказа (автор Н. Е. Шевченко) и опубликованных данных (Французов, 2006).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На основе качества опада растения древесного яруса можно разделить на 4 основные функциональные группы:

- 1) лиственные деревья с быстроразлагаемым опадом (к ним относятся виды родов *Acer*, *Fraxinus*, *Tilia*, *Ulmus*, *Betula*, *Alnus*);
- 2) лиственные деревья с медленно-разлагаемым опадом (*Populus*, *Quercus*, *Fagus*);
- 3) темнохвойные деревья (*Picea* / *Abies*);
- 4) светлохвойные (*Pinus*).

Основываясь на данных Ценофонда лесов Европейской России, в подзоне хвойно-широколиственных лесов Европейской России можно выделить до 160 различных таксономических типов леса. Древесный ярус этих лесов может быть монодоминантным, особенно на ранних стадиях сукцессии или в искусственных насаждениях, но чаще в древесном ярусе лесов подтаежной зоны сочетаются различные виды, относящиеся по качеству опада к разным функциональным группам. В связи с этим все разнообразие типов леса, встречающихся в подзоне хвойно-широколиственных лесов европейской

части России, можно отнести к 15 функциональным типам (табл. 1), выделенным на основе качества растительного опада, влияющего на уровень аккумуляции углерода в почве (Аккумуляция..., 2018; Кузнецова, 2022). В хвойно-широколиственных лесах Северо-Западного Кавказа на значительной площади развиты вторичные послерубочные сообщества со значительным уча-

стием мелколиственных видов деревьев (граба, ольхи, дуба, осины и др.). Старовозрастные малонарушенные леса сформированы, как правило, елью, дубом, буком и пихтой (Аккумуляция..., 2018). На основе качества растительного опада древесного яруса на Северо-Западном Кавказе выделяется 14 функциональных типов леса.

**Таблица 1.** Функциональные типы леса (ФТЛ) и соответствующие им группы типов леса в подзоне хвойно-широколиственных лесов европейской части России и в поясе хвойно-широколиственных лесов Северо-Западного Кавказа

ФТЛ	Состав древесного яруса	Группы типов леса равнины европейской части России (по Л. Б. Заугольной)	Типы леса, Северо-Западный Кавказ
A1	Преобладают виды лиственных деревьев с быстроразлагаемым опадом *	Березняки мелкотравно-бореальные, неморальные, нитрофильные и мезотрофно-болотные, липовые леса и сероольшаники неморальные и нитрофильные, черноольшаники и ясеновые леса нитрофильные	Грабовые овсяницево-разнотравные, жимолостно-разнотравные; ольшаники папоротниково-крупнотравные
A2	Преобладают виды лиственных деревьев с медленноразлагаемым опадом	Дубовые, осиново-дубовые неморальные и нитрофильные; осиново-бореально-неморальные, неморальные и нитрофильные	Буковые горноовсяницево-дубово-буковые разнотравные (подмаренниковые)
A3	Преобладают виды темнохвойных деревьев	Ельники кустарничково-и мелкотравно-зеленомошные, мелкотравно-бореальные, бореально-неморальные и неморальные; пихто-ельники бореально-неморальные	Пихтовые кислично-разнотравные (подмаренниковые), разнотравно-папоротниковые, разнотравно-горноовсяницево-кислично-мелкотравные; елово-пихтовые кислично-мелкотравные
A4	Преобладают виды светлохвойных деревьев	Сосновые леса зеленомошно-лишайниковые, ксерофитно-кустарничково-и мелкотравно-зеленомошные, мелкотравно-бореальные и неморальные, долгомошно-сфагновые	Сосновые леса рододендровые злаковые (вейниковые)

ФТЛ	Состав древесного яруса	Группы типов леса равнины европейской части России (по Л. Б. Заугольной)	Типы леса, Северо-Западный Кавказ
A5	Сочетаются ** виды темнохвойных и лиственных деревьев с быстроразлагаемым опадом	Еловые леса с липой и клёном неморальные и бореально-неморальные, пихтово-еловые с липой бореально-неморальные, еловые с берёзой кустарничково-зеленомошные, березовые с елью мелкотравно-бореальные и неморальные, липовые с елью неморальные и нитрофильные	Пихтово-грабовые рододендровые, пихтово-грабовые толстостенковые; грабовые с пихтой мелкотравные с малиной
A6	Сочетаются виды темнохвойных и лиственных деревьев с медленно-разлагаемым опадом	Дубово-еловые и елово-дубовые неморальные и мелкотравно-бореальные	Буково-пихтовые толстостенковые, разнотравные, мертвопокровные; пихтово-буковые кислично-мелкотравные
A7	Сочетаются виды светлохвойных и лиственных деревьев с быстроразлагаемым опадом	Сосняки с липой неморальные и бореально-неморальные, сосняки с берёзой неморальные и кустарничково-зеленомошные	Грабово-сосновые рододендрово-овсяницевые
A8	Сочетаются виды светлохвойных и лиственных деревьев с медленно-разлагаемым опадом	Сосняки с дубом ксерофитно-зеленомошные, бореально-неморальные; сосняки сложные бореально-неморальные	Буково-сосновые рододендровые
A9	Сочетаются виды лиственных деревьев с медленно- и быстроразлагаемым опадом	Берёзово-осиновые с липой, осиново-липовые с липой, вязо-липово-дубовые, липово-дубовые, липово-дубовые с ясенем, дубово-липовые, осиново-липовые неморальные; дубовые с ольхой черной нитрофильные	Грабово-буковые разнотравные, разнотравно-ежевичные; грабово-осиновые разнотравные; осиново-грабовые разнотравные; дубово-грабовые овсяницевые; осиново-грабовые папоротниково-разнотравные, жимолостно-мелкотравные, подмаренниковые; грабовые с примесью осины, бука и ясеня
A10	Сочетаются виды темнохвойных и светлохвойных деревьев	Сосняки с елью ксерофитно-, кустарничково- и мелкотравно-зеленомошные, долгомошно-сфагновые	Сосняки с пихтой и елью неморально-разнотравные; сосняки с пихтой вейниково-разнотравные
A11	Сочетаются виды темнохвойных и лиственных деревьев с быстро- и медленно-разлагаемым опадом	Липово-дубовые с елью, дубово-липовые с елью, еловые леса с липой и дубом неморальные; дубово-еловые с кленом бореально-неморальные	Буково-пихтово-грабовые жимолостно-разнотравные

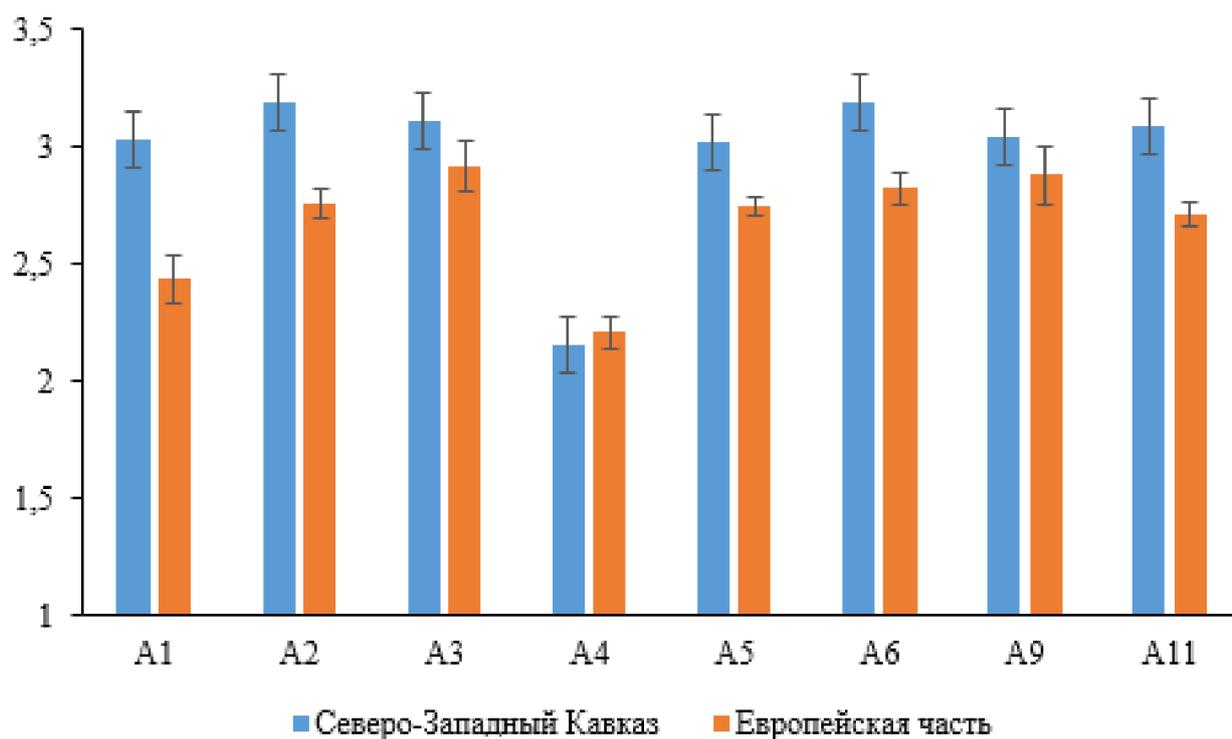
ФТЛ	Состав древесного яруса	Группы типов леса равнины европейской части России (по Л. Б. Заугольной)	Типы леса, Северо-Западный Кавказ
A12	Сочетаются виды темнохвойных, светлохвойных и лиственных деревьев с быстроразлагаемым опадом	Сосняки с елью и берёзой кустарничково-зеленомошные, ксеромезофильно-травяные, мелкотравно-бореальные	Сосняки с елью, пихтой и берёзой вейниковые
A13	Сочетаются виды темнохвойных, светлохвойных и лиственных деревьев с медленноразлагаемым опадом	Сосняки с осиной и елью кустарничково-зеленомошные, ельники с сосной и дубом (осиной) мелкотравно-зеленомошные	Сосново-осиново-пихтовые вейниковые; сосняки с елью, пихтой и осиной бобово-разнотравные; сосняки с пихтой и буком рододендрово-мертвопокровные
A14	Сочетаются виды светлохвойных и лиственных деревьев с быстро- и медленноразлагаемым опадом	Сосняки сложные бореально-неморальные, сосняки с берёзой и осиной кустарничково-зеленомошные	Сосново-буково-грабовые ожиновые
A15	Сочетаются виды светлохвойных, темнохвойных и лиственных деревьев с быстро- и медленноразлагаемым опадом	Сосновые с елью (с примесью березы, липы и дуба) ксеромезофильно-травяные, еловые с сосной (с берёзой и осиной, дубом) мелкотравно-бореальные	Не выявлены

\* Здесь и далее — доля преобладающей породы в общем проективном покрытии яруса составляет более 90%;

\*\* В древесном ярусе виды могут сочетаться в довольно широком диапазоне соотношений по проективному покрытию (50/50%, 90/10%).

Как известно, азот и углерод тесно связаны между собой в органическом веществе, а соотношения между ними являются тканеспецифичными и видоспецифичными. Сопряженность содержания азота и углерода в почве была также подтверждена ранее в ряде наших работ (Аккумуляция..., 2018; Кузнецова и др., 2021). На основании этого для косвенной оценки эффективности выполнения функции ак-

кумуляции углерода в почвах лесами, относящимися к разным ФТЛ, использована характеристика богатства почвы азотом, полученная на основе анализа видового состава по шкале почвенного богатства Э. Ландольта. Проанализированы геоботанические описания горных лесов Северо-Западного Кавказа и равнин европейской части России, отнесенных к одним и тем же ФТЛ (рис. 1).



**Рисунок 1.** Богатство почвы азотом (в баллах по шкале Э. Ландольта). Подписи по оси x — функциональные типы леса (см. табл. 1).

Примечание: Гистограмма построена по средним значениям баллов почвенного богатства на основе анализа 160 геоботанических описаний (по 10 описаний на каждый функциональный тип)

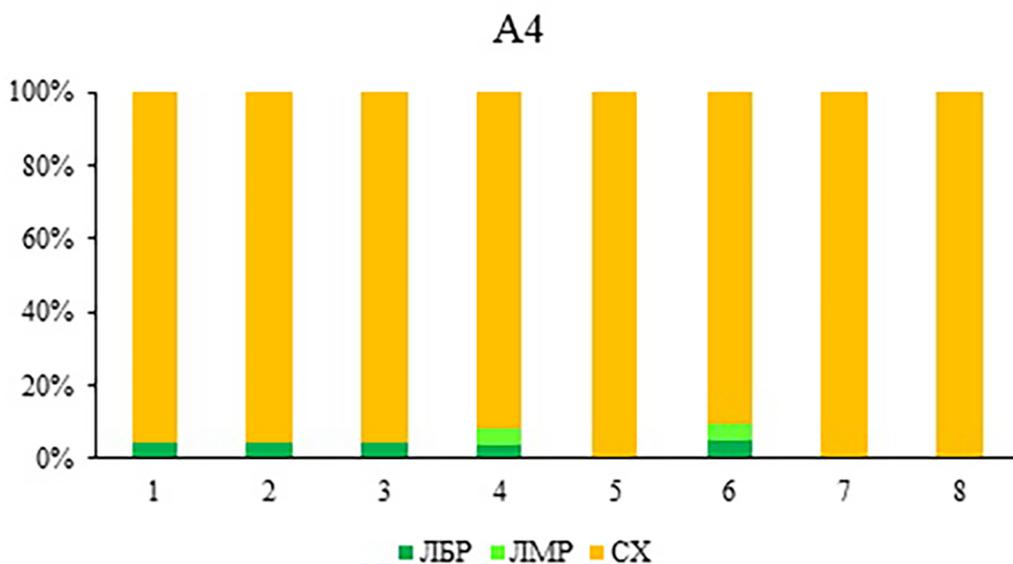
На Северо-Западном Кавказе значения почвенного богатства оказались выше во всех ФТЛ, кроме А4 (светлохвойные леса). В типе А4 отмечены самые низкие значения почвенного богатства и для Северо-Западного Кавказа, и для равнин европейской части, разница в значениях между двумя регионами также минимальна в этом типе. Несмотря на то, что значения почвенного богатства в лесных экосистемах, относящихся к одному ФТЛ, в регионах отличаются, что объясняется различиями в климатических, почвенных и орографических условиях, и на Северо-Западном Кавказе, и на равнинах европейской части России

наблюдается сходная тенденция изменения показателей почвенного богатства от типа к типу, что является подтверждением определяющей роли растительности и качества растительного опада в аккумуляции органического вещества в почве.

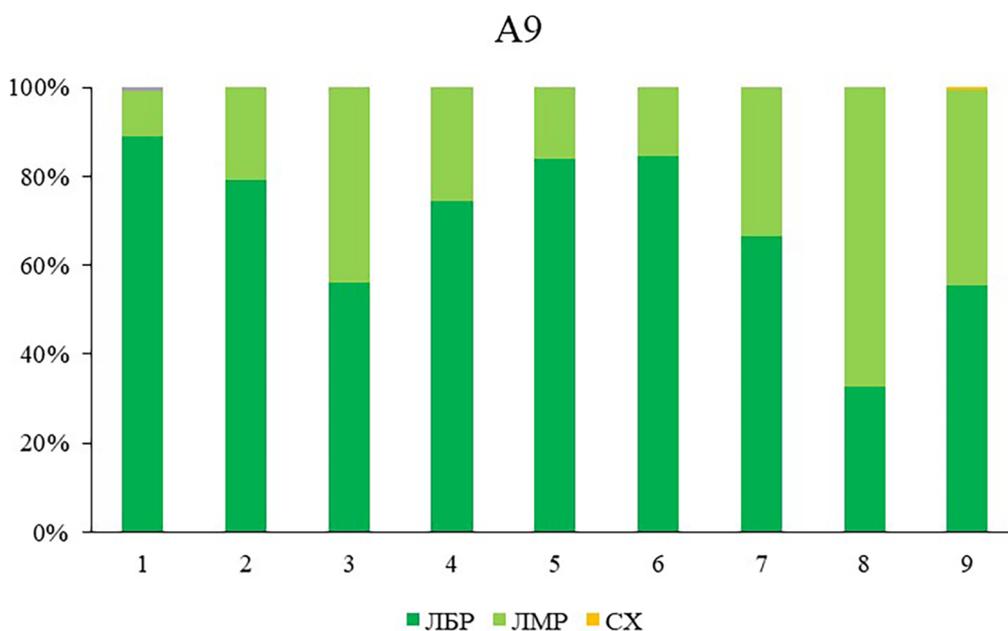
Прямые почвенные измерения были выполнены для лесов, относящихся к функциональным типам А4 (сосновые леса), А9 (смешанный тип, в ярусе А сочетаются лиственные породы деревьев с медленно- и быстроразлагаемым опадом), сформированных на супесчаных почвах в Брянском полесье и А11 (смешанные леса — в древесном ярусе сочетаются темнохвойные

и лиственные породы с быстро- и медленноразлагаемым опадом), произрастающих в Брянском полесье, а также на суглинках на Москворецко-Окской равнине. Процент-

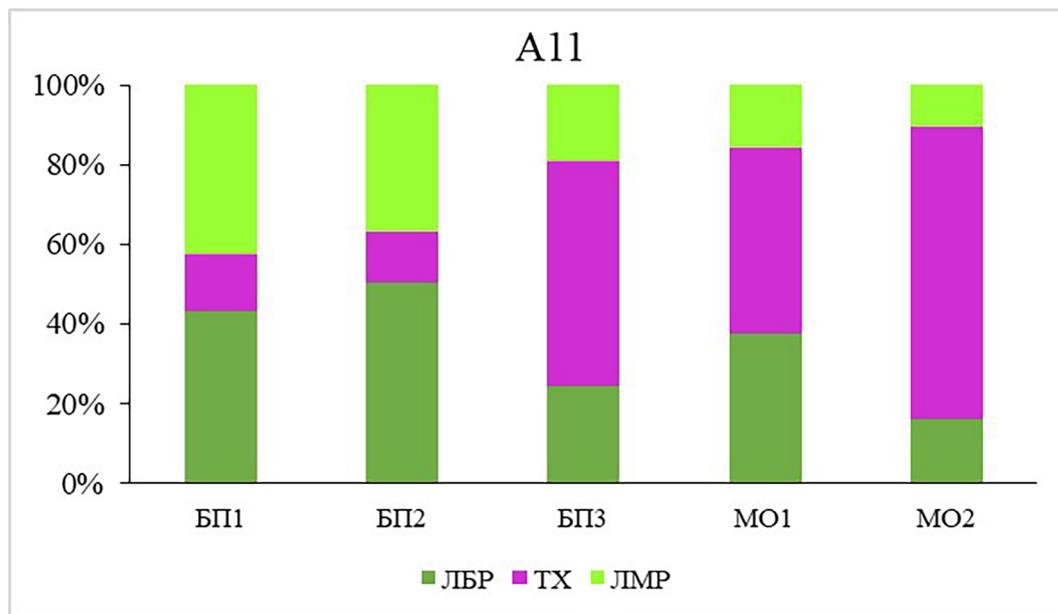
ное соотношение в проективном покрытии древесного яруса видов разных функциональных групп для лесов этих трёх ФТЛ показано на рисунках 2–4.



(a)



(б)



(в)

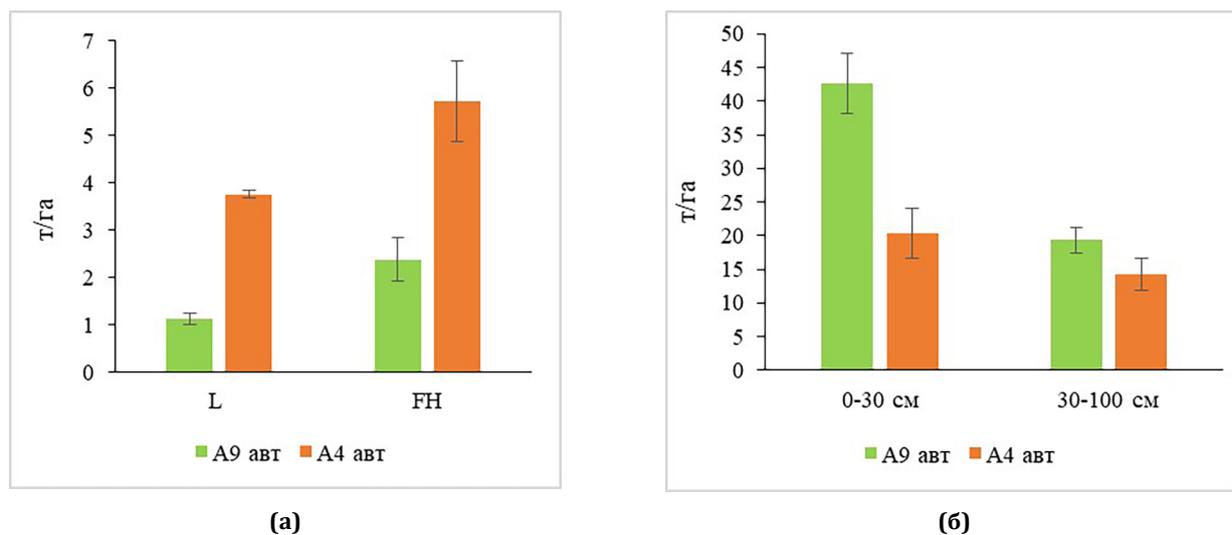
**Рисунок 2.** Соотношение проективного покрытия видов разных функциональных групп (ЛБР — лиственных деревьев с быстроразлагаемым опадом, ЛМР — лиственных с медленноразлагаемым опадом, ТХ — темнохвойных деревьев, СХ — светлохвойных деревьев) в ярусе А в лесных сообществах функционального типа А4 (а), функционального типа А9 (б) и А11 (в). Подписи оси х для а, б: порядковые номера площадок; для в: БП (1–3) — площадки в Брянском полесье, МО (1–2) — площадки на Москворецко-Окской равнине

В лесах типа А4 90% проективного покрытия древесного яруса составлено светлохвойными породами (в данном случае сосной *Pinus sylvestris*), в лесах типа А9 могут сочетаться лиственные деревья разных функциональных групп в разном соотношении.

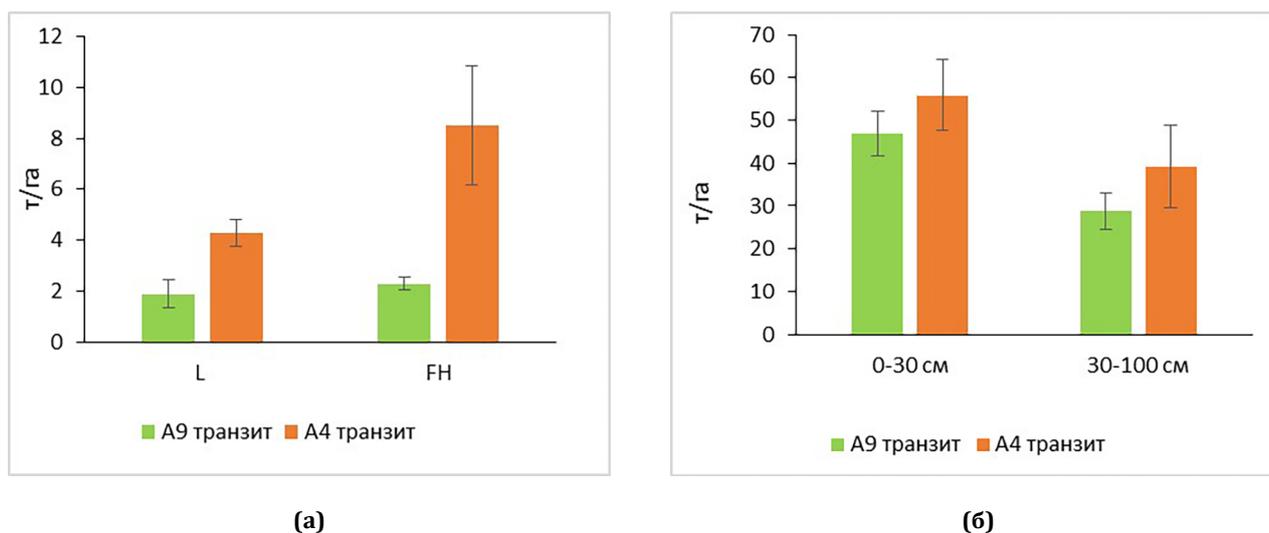
В лесах А11 участие в древесном ярусе деревьев темнохвойных пород (ТХ), лиственных с быстро- (ЛБР) и медленнораз-

лагаемым (ЛМР) опадом может быть различным.

Почвенные измерения в лесах Брянского полесья, формирующихся в сходных позициях ландшафта и климатических условиях на почвообразующих породах сходного состава, также выявили разницу в величине запасов углерода в почве лесов, отнесенных к различным ФТЛ (рис. 3, 4)



**Рисунок 3.** Запасы углерода в лесной подстилке (а) и минеральном слое почвы (б) в лесных экосистемах функциональных типов А9 и А4 в автономных ландшафтах, т/га. Подписи оси x: L, FH — подгоризонты подстилки, 0–30 см, 30–100 см — слои почвы (минеральная часть)



**Рисунок 4.** Запасы углерода в лесной подстилке (а) и минеральном слое почвы (б) в лесных экосистемах функциональных типов А9 и А4 в транзитных ландшафтах, т/га

В автономных ландшафтах запасы углерода лесной подстилки в осиново-березовых лесах (ФТЛ А9) и сосняках (ФТЛ А4) различаются ( $p = 0.052$ ) как для подгоризонта L подстилки, так и для подгоризонта FH, в минеральном профиле различия наиболее выражены в верхнем (0–30 см) слое ( $p = 0.052$ ) (рис. 3 (а)): запасы углерода в подстилке в сосновых лесах типа А4 выше, в минеральных горизонтах почв, напротив, запасы углерода больше в ФТЛ А9 (рис. 3 (б)).

В транзитных ландшафтах запасы углерода значимо различаются между двумя ФТЛ только в подгоризонте FH ( $p=0.008$ ), тогда как в минеральном профиле значимых различий при данной выборке не обнаружено (рис. 4).

Выполнены также оценки влияния механического состава почвообразующих пород и позиций в ландшафте на функцию депонирования углерода в почве лесов, относящихся к одному и тому же ФТЛ.

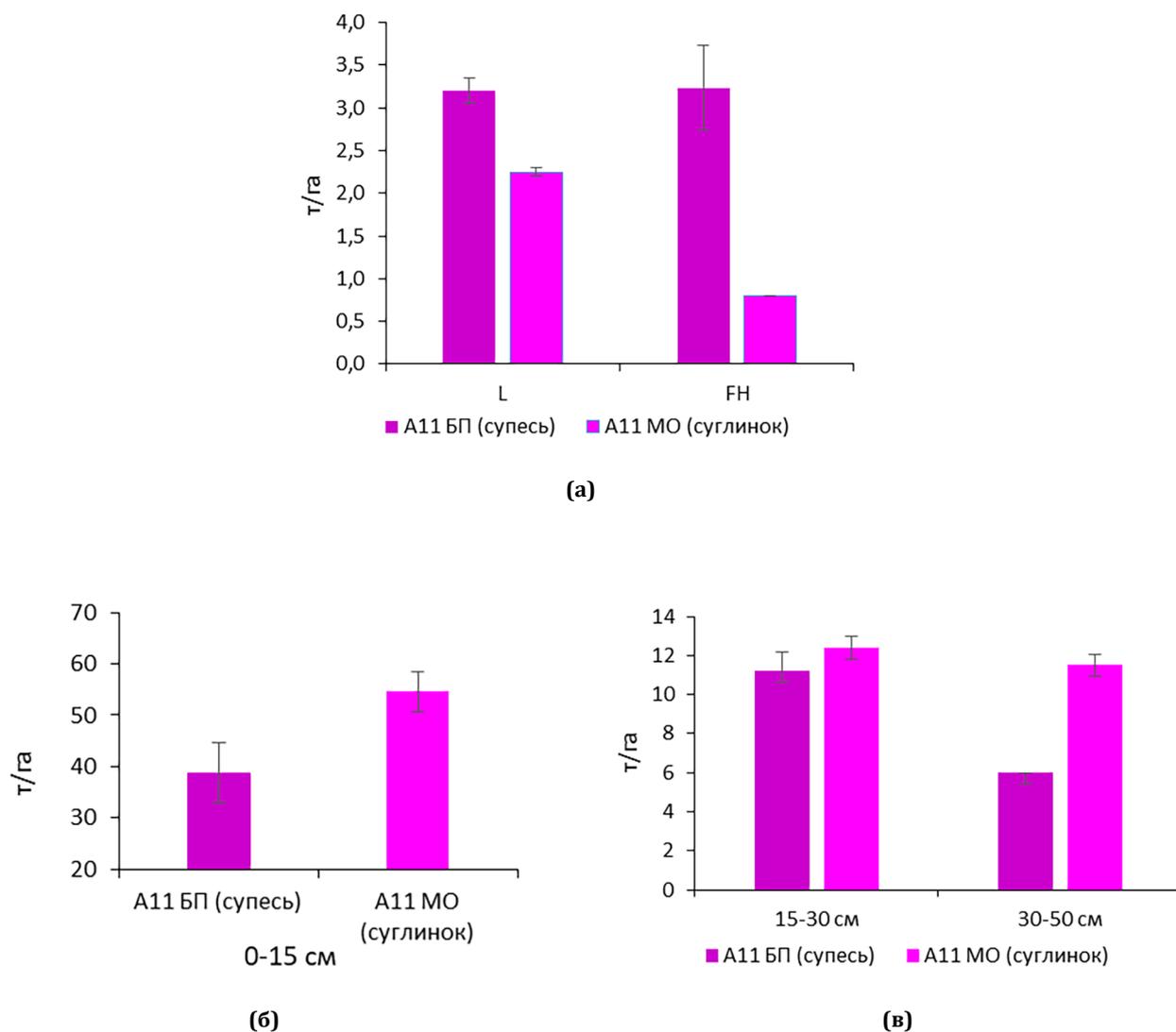
При сравнении запаса углерода в почвах ФТЛ А9, формирующихся в разных ландшафтных позициях, не обнаружено различий в запасах углерода в минеральных слоях: средние значения запасов углерода составляют 36.2 т/га, 6.5 т/га, 23.0 т/га в автономных позициях ландшафта в минеральных слоях 0–15, 15–30 и 30–100 см почв, соответственно. В транзитных позициях запасы почвенного углерода в среднем составляют 33.0 т/га, 13.9 т/га и 24.4 т/га в слоях 0–15, 15–30

и 30–100 см, соответственно. Возможно, отсутствие статистически значимых различий связано с недостаточной выборкой.

Ожидаемые выраженные различия в запасах углерода в почве между автономными и транзитными ландшафтами обнаруживаются в лесах типа А4 (светлохвойных). U-критерий Манна-Уитни в данном случае подтвердил достоверность различий между запасами углерода в почвах лесов, формирующихся в транзитных и автономных ландшафтах в слое почвы 0–30 см и 30–100 см ( $p = 0.037$ ): 20.3 т/га и 14.2 т/га в транзитных условиях соответственно и 55.9 т/га и 39.2 т/га в автономных условиях соответственно.

Запасы углерода в почвах лесов типа А11, формирующихся на разных по механическому составу почвообразующих породах в Брянском полесье и на Москворецко-Окской равнине в сходных, автономных, ландшафтах различаются в подстилке и минеральном слое 0–15 см (рис. 5).

Запасы углерода подстилки (подгоризонт FH) выше в лесах на супесчаных почвах, тогда как в минеральных горизонтах почв (в слоях 0–15 см, 15–30 см, 30–50 см) запасы почвенного углерода выше в лесах на суглинках. Максимальные различия (почти в 2 раза) отмечаются в слое почвы от 30 до 50 см, также видимые различия отмечены в верхней части минерального слоя (0–15 см). В данном случае невозможно оценить достоверность различий из-за малого размера выборки.



**Рисунок 5.** Запасы углерода в лесной подстилке (а) и минеральных слоях почвы (б, в) в ФЛТ А11, т/га. На оси х: L, FH — подгоризонты подстилки; 0–15 см, 15–30 см, 30–50 см — слои почвы (минеральная часть)

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Качество растительного опада имеет существенное значение в аккумуляции почвенного органического вещества и динамике пулов почвенного углерода и может быть информативным индикатором для классификации лесов по эффективности

выполнения ими функции регулирования цикла углерода.

В хвойно-широколиственных лесах значительная доля растительного опада формируется древесными растениями. Качество опада древесных растений оказывает влияние на накопление почвенного

углерода в лесах этой зоны. На основе качества опада растения древесного яруса можно разделить на 4 основных функциональных группы: лиственные деревья с быстроразлагаемым опадом, лиственные деревья с медленноразлагаемым опадом, темнохвойные и светлохвойные деревья.

В подзоне хвойно-широколиственных лесов распространены как монодоминантные, так и полидоминантные лесные сообщества, где в древесном ярусе могут сочетаться виды разных функциональных групп. С учетом различных вариантов сочетаний таких видов в древостое предварительно выделено 15 функциональных типов лесов (ФТЛ). На равнинах европейской части России встречаются все 15 ФТЛ; почти все аналогичные ФТЛ представлены в поясе хвойно-широколиственных лесов Северо-Западного Кавказа. В данной статье лишь демонстрируются различия в запасах углерода в почвах с использованием данных прямых измерений в ФТЛ и с использованием косвенной оценки почвенного богатства на основе экологической шкалы.

Подтверждается влияние почвообразующих пород на аккумуляцию углерода в почве: отмечена разница в запасах почвенного углерода в одном и том же ФТЛ на суглинистых и супесчаных почвах. Также подтверждаются различия в запасах

почвенного углерода в лесах, формирующихся в различных ландшафтных позициях: в транзитных ландшафтах запасы углерода в почвах выше, чем в автономных в лесах функционального типа А4 (с преобладанием видов светлохвойных деревьев), но в лесах функционального типа А9 (с сочетанием видов лиственных деревьев с медленно- и быстроразлагаемым опадом) влияние позиции в ландшафте не выявлено.

В целях проверки обнаруженных на небольшой выборке связей между ФТЛ и запасами углерода в почвах с учетом механического состава почвообразующих пород и позиции в ландшафте необходимо продолжить исследования для увеличения объема выборки.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках ВИП ГЗ (регистрационный номер 122110700044-2) в соответствии с распоряжением Правительства Российской Федерации № 2515-р от 2 сентября 2022 г.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Аккумуляция углерода в лесных почвах и сукцессионный статус лесов / Под ред. Н. В. Лукиной. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2018. 232 с.
- Баева Ю. И., Курганова И. Н., Почикалов А. В., Кудеяров В. Н. Физические свойства и изменение запасов углерода серых лесных почв в ходе постагрогенной эволюции (юг Московской области) // Почвоведение. 2017. № 3. С. 345–353.
- Бахмет О. Н. Запасы углерода в почвах основных и еловых лесов Карелии // Лесоведение. 2018. № 1. С. 48–55.
- Бобкова К. С., Машика А. В., Смагин А. В. Динамика содержания углерода органического вещества в среднетаежных ельниках на автоморфных почвах. СПб.: Наука, 2014. 270 с.
- Демаков Ю. П., Исаев А. В., Нуреев Н. Б., Митякова И. И. Границы и причины варибельности запасов гумуса в почвах лесов Среднего Поволжья // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Лес. Экология. Природопользование. 2018. № 3. С. 30–49.
- Дымов А. А. Почвы послерубочных, постпирогенных и постагрогенных лесных экосистем северо-востока европейской части России. Автореф. дисс. канд. биол. наук. М.: МГУ, 2018. 46 с.
- Кузнецова А. И. Влияние растительности на запасы углерода в почвах доминирующих хвойно-широколиственных лесов европейской части России. Дисс. канд. биол. наук: 06.03.02. М.: Институт лесоведения РАН, 2022. 130 с.
- Кузнецова А. И., Гераськина А. П., Лукина Н. В., Смирнов В. Э., Тихонова Е. В., Горнов А. В., Шевченко Н. Е., Тебенькова Д. Н., Ручинская Е. В. Влияние биотических и абиотических факторов на запасы почвенного углерода в лесах // Биоразнообразие и функционирование лесных экосистем. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2021. С. 131–152.
- Лукина Н. В., Гераськина А. П., Кузнецова А. И., Смирнов В. Э., Горнов А. В., Шевченко Н. Е., Тихонова Е. В., Тебенькова Д. Н., Басова Е. В. Функциональная классификация лесов: актуальность и подходы к разработке // Лесоведение. 2021. № 6. С. 566–580.
- Мажитова Г. Г., Казаков В. Г., Лопатин Е. В., Виртанен Т. Геоинформационная система для бассейна р. Усы (Республика Коми) и расчет запасов почвенного углерода // Почвоведение. 2003. № 2. С. 133–144.
- Машика А. В. Динамика содержания органического углерода в почвах еловых лесов подзоны средней тайги. Автореф. дисс. канд. биол. наук: 03.00.16. М.: Институт лесоведения РАН, 2005. 24 с.
- Рыжова И. М., Телеснина В. М., Ситникова А. А. Динамика свойств почв и структуры запасов углерода в постагрогенных экосистемах в процессе естественного лесовосстановления // Почвоведение. 2020. № 2. С. 230–243.
- Телеснина В. М., Курганова И. Н., Овсепян Л. А., Личко В. И., Ермолаев А. М., Мирин Д. М.

- Динамика свойств почв и состава растительности в ходе постагрогенного развития в разных биоклиматических зонах // Почвоведение. 2017. № 12. С. 1514–1534.
- Французов А. А. Флористическая классификация лесов с *Fagus orientalis* Lypsky и *Abies nordmanniana* (Stev.) Spach в бассейне реки Белой (Западный Кавказ) // Растительность России. 2006. № 9. С. 76–85.
- Ценофонд лесов Европейской России. URL: <http://cepl.rssi.ru/bio/flora/main.htm> (дата обращения 01.10.2022).
- Честных О. В., Грабовский В. И., Замолодчиков Д. Г. Углерод почв лесных районов Европейско-Уральской части России // Вопросы лесной науки. 2020. Т. 3. № 2. С. 1–15.
- Честных О. В., Замолодчиков Д. Г., Уткин А. И. Общие запасы биологического углерода и азота в почвах лесного фонда России // Лесоведение. 2004. № 4. С. 30–42.
- Щепашенко Д. Г., Мухортова Л. В., Швиденко А. З., Ведрова Э. Ф. Запасы органического углерода в почвах России // Почвоведение. 2013. № 2. С. 123–123.
- Berg B., McClaugherty C. Plant Litter. 4th ed. Switzerland, Cham: Springer, 2020. 332 p.
- Castellano M. J., Mueller K. E., Olk D. C., Sawyer J. E., Six J. Integrating plant litter quality, soil organic matter stabilization, and the carbon saturation concept // Global Change Biology. 2015. Vol. 21. No. 9. P. 3200–3209.
- Cornelissen J. H., Lang S. I., Soudzilovskaia N. A., During H. J. Comparative cryptogam ecology: A review of bryophyte and lichen traits that drive biogeochemistry // Annals of Botany. 2007. Vol. 99. No. 5. P. 987–1001.
- Dijkstra F. A., Fitzhugh R. D. Aluminum solubility and mobility in relation to organic carbon in surface soils affected by six tree species of the northeastern United States // Geoderma. 2003. Vol. 114. No. 1–2. P. 33–47.
- Finzi A. C., Van Breemen N., Canham C. D. Canopy tree–soil interactions within temperate forests: species effects on soil carbon and nitrogen // Ecological Applications. 1998. Vol. 8. No. 2. P. 440–446.
- Hagen-Thorn A., Callesen I., Armolaitis K., Nihlgård B. The impact of six European tree species on the chemistry of mineral topsoil in forest plantations on former agricultural land // Forest Ecology and Management. 2004. Vol. 195. No. 3. P. 373–384.
- Krishna M. P. Litter decomposition in forest ecosystems: a review // Energy, Ecology and Environment. 2017. Vol. 2. No. 4. P. 236–249.
- Lovett G. M., Weathers K. C., Arthur M. A., Schultz J. C. Nitrogen cycling in a northern hardwood forest: do species matter? // Biogeochemistry. 2004. Vol. 67. No. 3. P. 289–308.
- Lukina N., Kuznetsova A., Tikhonova E., Smirnov V., Danilova M., Gornov A.,

- Bakhmet O., Kryshen A., Tebenkova D., Shashkov M., Knyazeva S.* Linking forest vegetation and soil carbon stock in Northwestern Russia // *Forests*. 2020. Vol. 11. No. 9. Article 979.
- Neiryneck J., Mirtcheva S., Sioen G., Lust N.* Impact of *Tilia platyphyllos* Scop., *Fraxinus excelsior* L., *Acer pseudoplatanus* L., *Quercus robur* L. and *Fagus sylvatica* L. on earthworm biomass and physico-chemical properties of a loamy topsoil // *Forest Ecology and Management*. 2000. Vol. 133. No. 3. P. 275–286.
- Oostra S., Majdi H., Olsson M.* Impact of tree species on soil carbon stocks and soil acidity in southern Sweden // *Scandinavian Journal of Forest Research*. 2006. Vol. 21. No.5. P. 364–371.
- Reich P. B., Oleksyn J., Modrzyński J., Mrozinski P., Hobbie S. E., Eissenstat D. M., Tjoelker M. G.* Linking litter calcium, earthworms and soil properties: a common garden test with 14 tree species // *Ecology Letters*. 2005. Vol. 8. No. 8. P. 811–818.
- Bakhmet O. N.,* Zapasy ugleroda v pochvah sosnovykh i elovykh lesov Karelii (Carbon reserves in the soils of pine and spruce forests of Karelia), *Lesovedenie*, 2018, No 1, pp. 48–55.
- Berg B., McClaugherty C.,* *Plant Litter*, 4th ed. Switzerland, Cham: Springer, 2020, 332 p.
- Bobkova K. S., Mashika A. V., Smagin A. V.,* *Dinamika sodержaniya ugleroda organicheskogo veshhestva v srednetaezhnykh el'nikakh na avtomorfnykh pochvah* (Dynamics of the carbon content of organic matter in middle taiga spruce forests on automorphic soils), Saint-Petersburg: Nauka, 2014, 270 p.
- Castellano M. J., Mueller K. E., Olk D. C., Sawyer J. E., Six J.,* Integrating plant litter quality, soil organic matter stabilization, and the carbon saturation concept, *Global change biology*, 2015, Vol. 21, No 9. pp. 3200–3209.
- Cenofond lesov Evropejskoj Rossii*, URL: <http://cepl.rssi.ru/bio/flora/main.htm> (2022, 1 October).
- Chestnykh O. V., Grabovskij V. I., Zamolodchikov D. G.,* Uglerod pochv lesnykh rajonov Evropejsko-Ural'skoj chasti Rossii (Carbon of soils of forest areas of the European-Ural part of Russia), *Voprosy lesnoj nauki*, 2020, Vol. 3, No 2, pp. 1–15.

## REFERENCES

*Akkumuljacija ugleroda v lesnykh pochvah i successionnyj status lesov* (Carbon accumulation in forest soils and the successional status of forests), Lukina N. V. (Ed.), Moscow: KMK, 2018, 232 p.

Baeva Ju. I., Kurganova I. N., Pochikalov A. V., Kudejarov V. N., Fizicheskie svojstva i izmenenie zapasov ugleroda serykh lesnykh

- Chestnyh O. V., Zamolodchikov D. G., Utkin A. I., Obshhie zapasy biologicheskogo ugleroda i azota v pochvah lesnogo fonda Rossii (Total reserves of biological carbon and nitrogen in the soils of the forest fund of Russia), *Lesovedenie*, 2004, No 4, pp. 30–42.
- Cornelissen J. H., Lang S. I., Soudzilovskaia N. A., During H. J., Comparative cryptogam ecology: A review of bryophyte and lichen traits that drive biogeochemistry, *Ann. Bot.*, 2007, Vol. 99, No. 5, pp. 987–1001.
- Demakov Ju. P., Isaev A. V., Nureev N. B., Mitjakova I. I., Granicy i prichiny variabel'nosti zapasov gumusa v pochvah lesov Srednego Povolzh'ja (Boundaries and causes of variability of humus reserves in the soils of forests of the Middle Volga region), *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tehnologicheskogo universiteta. Serija: Les. Jekologija. Prirodopol'zovanie*, 2018, No 3, pp. 30–49.
- Dijkstra F. A., Fitzhugh R. D., Aluminum solubility and mobility in relation to organic carbon in surface soils affected by six tree species of the northeastern United States, *Geoderma*, 2003, Vol. 114, No 1–2, pp. 33–47.
- Dymov A. A., *Pochvy poslerubochnyh, postpirogennyh i postagrogennyh lesnyh jekosistem severo-vostoka evropejskoj chasti Rossii*, Avtoref. diss. kand. biol. nauk (Soils of post-harvest, post-pyrogenic and post-agrogenic forest ecosystems of the northeast of the European part of Russia, Candidate's biological sci. thesis), Moscow: MGU, 2018, 46 p.
- Finzi A. C., Van Breemen N., Canham C. D., Canopy tree–soil interactions within temperate forests: species effects on soil carbon and nitrogen, *Ecological applications*, 1998, Vol. 8, No 2, pp. 440–446.
- Francuzov A. A., Floristicheskaja klassifikacija lesov s *Fagus orientalis* Lypsky i *Abies nordmanniana* (Stev.) Spach v bassejne reki Beloj (Zapadnyj Kavkaz) (Dynamics of soil properties and vegetation composition during postagrogenic development in different bioclimatic zones Floristic classification of forests with *Fagus orientalis* Lypsky and *Abies nordmanniana* (Stev.) Spach in the Belaya River basin (Western Caucasus), *Rastitel'nost' Rossii*, 2006, No 9, pp. 76–85.
- Hagen-Thorn A., Callesen I., Armolaitis K., Nihlgård B., The impact of six European tree species on the chemistry of mineral topsoil in forest plantations on former agricultural land, *Forest ecology and management*, 2004, Vol. 195, No 3, pp. 373–384.
- Krishna M. P., Litter decomposition in forest ecosystems: a review, *Energy, Ecology and Environment*, 2017, Vol. 2, No 4, pp. 236–249.
- Kuznecova A. I., *Vlijanie rastitel'nosti na zapasy ugleroda v pochvah dominirujushhij hvojno-shirokolistvennyh lesov evropejskoj chasti Rossii*, Diss. kand. biol. nauk (The influence of vegetation on carbon stocks in the soils of the dominant coniferous-deciduous forests of the European part of Russia, Diss. cand. biol. science), Moscow: Institut lesovedenija RAN, 2022, 130 p.

- Kuznetsova A. I., Geraskina A. P., Lukina N. V., Smirnov V. Je., Tihonova E. V., Gornov A. V., Shevchenko N. E., Teben'kova D. N., Ruchinskaja E. V., Vlijanie bioticheskikh i abioticheskikh faktorov na zapasy pochvennogo ugleroda v lesah (Influence of biotic and abiotic factors on soil carbon stocks in forests), In: *Bioraznoobrazie i funkcionirovanie lesnyh jekosistem* (Biodiversity and functioning of forest ecosystems), Lukina N. V. (Ed.). Moscow: Tovarishestvo nauchnyh izdanij KMK, 2021, pp. 131–152.
- Lovett G. M., Weathers K. C., Arthur M. A., Schultz J. C., Nitrogen cycling in a northern hardwood forest: do species matter, *Biogeochemistry*, 2004, Vol. 67, No 3, pp. 289–308.
- Lukina N. V., Geraskina A. P., Kuznetsova A. I., Smirnov V. Je., Gornov A. V., Shevchenko N. E., Tihonova E. V., Teben'kova D. N., Basova E. V., Funkcional'naja klassifikacija lesov: aktual'nost' i podhody k razrabotke (Functional classification of forests: relevance and approaches to development), *Lesovedenie*, 2021, No 6, pp. 566–580.
- Lukina N., Kuznetsova A., Tikhonova E., Smirnov V., Danilova M., Gornov A., Bakhmet O., Kryshen A., Tebenkova D., Shashkov M., Knyazeva S., Linking Forest Vegetation and Soil Carbon Stock in Northwestern Russia, *Forests*, 2020, Vol. 11, No 9, Article 979.
- Mashika A. V., *Dinamika sodержaniya organicheskogo ugleroda v pochvah elovyh lesov podzony srednej tajgi* (Dynamics of organic carbon content in the soils of spruce forests of the Middle taiga subzone, Candidate's biological sci. thesis), Moscow: Institut lesovedeniya RAN, 2005, 24 p.
- Mazhitova G. G., Kazakov V. G., Lopatin E. V., Virtanen T., Geoinformacionnaja sistema dlja bassejna r. Usy (Respublika Komi) i raschet zapasov pochvennogo ugleroda (Geoinformation system for the river basin Moustache (Komi Republic) and calculation of soil carbon reserves), *Pochvovedenie*, 2003. No 2, pp. 133–144.
- Neiryneck J., Mirtcheva S., Sioen G., Lust N., Impact of *Tilia platyphyllos* Scop., *Fraxinus excelsior* L., *Acer pseudoplatanus* L., *Quercus robur* L. and *Fagus sylvatica* L. on earthworm biomass and physico-chemical properties of a loamy topsoil, *Forest Ecology and Management*, 2000, Vol. 133, No. 3, pp. 275–286.
- Oostra S., Majdi H., Olsson M., Impact of tree species on soil carbon stocks and soil acidity in southern Sweden, *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2006, Vol. 21, No 5, pp. 364–371.
- Reich P. B., Oleksyn J., Modrzyński J., Mrozinski P., Hobbie S. E., Eissenstat D. M., Tjoelker M. G., Linking litter calcium, earthworms and soil properties: a common garden test with 14 tree species, *Ecology letters*, 2005, Vol. 8, No 8, pp. 811–818.
- Ryzhova I. M., Telesnina V. M., Sitnikova A. A., Dinamika svojstv pochv i struktury zapasov ugleroda v postagrogennyh jekosistemah v processe estestvennogo lesovosstanovlenija (Dynamics of soil prop-

erties and structure of carbon stocks in postagrogenic ecosystems in the process of natural reforestation), *Pochvovedenie*, 2020, No 2, pp. 230–243.

Shchepashchenko D. G., Muhortova L. V., Shvidenko A. Z., Vedrova Je. F., Zapasy organicheskogo ugleroda v pochvah Rossii (Reserves of organic carbon in the soils of Russia), *Pochvovedenie*, 2013, No 2, pp. 123–123.

Telesnina V. M., Kurganova I. N., Ovsepjan L. A., Lichko V. I., Ermolaev A. M., Mirin D. M., Dinamika svojstv pochv i sostava rastitel'nosti v hode postagrogennogo razvitiya v raznyh bioklimaticheskikh zonah (Dynamics of soil properties and vegetation composition during postagrogenic development in different bioclimatic zones), *Pochvovedenie*, 2017, No 12, pp. 1514–1534.

# QUALITY OF WOOD LITTER AS AN INFORMATIVE INDICATOR OF FUNCTIONAL CLASSIFICATION OF FORESTS

E. V. Basova<sup>1</sup>, N. V. Lukina<sup>1</sup>, A. I. Kuznecova<sup>1</sup>, A. V. Gornov<sup>1</sup>, N. E. Shevchenko<sup>1</sup>,  
E. V. Tikhonova<sup>1</sup>, A. P. Geraskina<sup>1</sup>, T. Yu. Braslavskaya<sup>1</sup>, D. N. Teben'kova<sup>1</sup>, D. L. Lugovaya<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Center for Forest Ecology and Productivity of the RAS  
Profsoyuznaya st. 84/32 bldg. 14, Moscow, 117997, Russia

<sup>2</sup> WWF-Russia  
Nikoloyamskaya st. 19, bldg. 3, Moscow, 109240, Russia

E-mail: lenabasova7@gmail.com

Received: 01.09.2022

Revised: 17.10.2022

Accepted: 18.11.2022

**Relevance and goals.** In the context of global climate change, the climate-regulating function of forests deserves special attention. There is still no functional classification of forests according to the effectiveness of their carbon storage function. The purpose of this article is to discuss an approach to such classification based on the assessment of the quality of tree litter.

**Objects and methods.** To test the approach to the identification of functional types of forests (FTL) based on the quality of tree litter, taking into account the position in the landscape and the mechanical composition of soil-forming rocks, data on soils and vegetation obtained at 23 sites operating in the subzone of coniferous-broadleaf forests of the European part of Russia on the territory of Bryansk Polesie and Moskvoretsko-Okская plain were used. For indirect (on the ecological scale of E. Landolt using the SpeDiv program) to assess differences in the soil richness of forests belonging to different FTLS, the species composition of 160 descriptions of forest vegetation of the Moscow, Bryansk, Smolensk, Kostroma regions, Krasnodar Krai and the Republic of Adygea (North-Western Caucasus) was analyzed.

**Results.** Examples of functional forest types (FTL) for coniferous and broad-leaved forests of the European part of Russia are given. The differences in the level of soil carbon accumulation between different FTLS are shown, and a preliminary assessment of the influence of the position in the landscape and the mechanical composition of soils on the accumulation of carbon in soils within FTLS is given.

**Conclusion.** Based on the quality of the fall of tree litter, 15 FTL were identified, which are confirmed by examples based on geobotanical descriptions of forest communities common in the zone of coniferous-deciduous forests of the European part of Russia and in the belt of coniferous-deciduous forests of the North-Western Caucasus. The validity of the allocation of FTL for the efficiency of carbon accumulation in soils based on the quality of plant litter, taking into account the influence of "external factors" (the position in the landscape and the mechanical composition of soil-forming rocks) is confirmed by data obtained at 23 sites; estimates of the carbon reserves in the soil, as well as the soil richness estimated on an ecological scale, revealed differences between the allocated FTLS. Differences in carbon stocks in forest ecosystems in the same FTL formed on loamy and sandy loam soil-forming rocks were revealed. Differences in soil carbon reserves in forests belonging to the same FTL, but formed at different positions in the landscape, have been confirmed; in transit landscapes, soil carbon reserves are higher than in autonomous ones.

**Key words:** coniferous-deciduous forests, functional classification, functional types of forests, carbon stocks

**Рецензент:** д. б. н. Голубева Е. И.