 © Авторы статьи / Authors of the article

ЛЕСОВЕДЕНИЕ, ЛЕСОВОДСТВО, ЛЕСНЫЕ КУЛЬТУРЫ, АГРОЛЕСОМЕЛИОРАЦИЯ, ОЗЕЛЕНЕНИЕ, ЛЕСНАЯ ПИРОЛОГИЯ И ТАКСАЦИЯ/FORESTRY, FORESTRY, FOREST CROPS, AGROFORESTRY, LANDSCAPING, FOREST PYROLOGY AND TAXATION

DOI: https://doi.org/10.60797/JAE.2026.72.1 EDN: YKXTHI

ЗАПАСЫ И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ УГЛЕРОДА В КОМПОНЕНТАХ ФИТОМАССЫ СВЕТЛОХВОЙНЫХ ЛЕСОВ ПРИБАЙКАЛЬЯ

Научная статья

Мильхеев Е.[1,] *, Чимитдоржиева Г.Д.[2], Чимитдоржиева Э.О.[3], Цыбенов Ю.Б.[4]
[1] ORCID : 0000-0002-9949-4703;
[2] ORCID : 0000-0001-8566-3994;
[3] ORCID : 0000-0002-0227-5433;
[1, 2, 3, 4] Институт общей и экспериментальной биологии СО РАН, Улан-Удэ, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (evgmilh[at]gmail.com)

Предложена: 25.11.2025; Принята: 28.02.2026; Опубликована: 19.08.2026

Аннотация

Настоящее исследование оценивает запасы и распределение углерода в светлохвойных лесах Прибайкальского заказника (Республика Бурятия), подвергшихся воздействию неоднократных пожаров. На 5 пробных площадях (ПП) были детально изучены компоненты фитомассы (древесина, кора, ветви, хвоя/листья, опад, валеж), определено содержание углерода на автоматическом CHNS-анализаторе. Установлено, что содержание углерода значительно варьирует в зависимости от вида растения, типа ткани и степени пирогенного воздействия, достигая максимума в коре берёзы (57,37%) и ветвях сосны на гарях (56,78%), и минимума в корнях травянистых растений (32,64%). Использование усреднённых коэффициентов (например, 50% для древесины) может приводить к погрешностям до 10%, что подчеркивает необходимость видово-тканевых коэффициентов. Запасы углерода существенно снижены на нарушенных пожарами участках: на контрольном ненарушенном участке (ПП-3, зрелый сосняк) они составили 76,93 т С/га, тогда как на сильнонарушенном участке (ПП-5, после верхового пожара 2015 г.) — лишь 32,85 т С/га. В постпирогенной динамике отмечается доминирование краткосрочных углеродных пулов, таких как валеж (составляющий 15% общего запаса на ПП-5) и ветви с аномально высоким содержанием углерода, на фоне активного восстановления травяного покрова, но медленного накопления древесной биомассы. Ключевые выводы исследования заключаются в том, что пожары снижают долгосрочные углеродные пулы (древесину) на 50–80%, кора берёзы является критически важным резервуаром углерода (до 57,4%), а для точной оценки углеродных запасов необходимы видовые коэффициенты вместо стандартных значений МГЭИК.

Ключевые слова: пулы углерода, постпирогенное восстановление, лесные пожары, Прибайкальский заказник.

CARBON RESERVES AND DISTRIBUTION IN THE COMPONENTS OF THE PLANT BIOMASS OF THE LIGHT CONIFEROUS FORESTS OF BAIKALIA

Research article

Milkheev E.[1,] *, Chimitdorzhieva G.D.[2], Chimitdorzhieva E.O.[3], Tsibenov Y.B.[4]
[1] ORCID : 0000-0002-9949-4703;
[2] ORCID : 0000-0001-8566-3994;
[3] ORCID : 0000-0002-0227-5433;
[1, 2, 3, 4] Institute of General and Experimental Biology, Ulan-Ude, Russian Federation

* Corresponding author (evgmilh[at]gmail.com)

Suggested: 25.11.2025; Accepted: 28.02.2026; Published: 19.08.2026

Abstract

This research evaluates carbon reserves and distribution in light coniferous forests of the Baikal Nature Reserve (Republic of Buryatia) that have been affected by repeated fires. On five sample plots (SPs), the components of plant biomass (wood, bark, branches, needles/leaves, litter, deadwood) were studied in detail, and carbon content was determined using an automatic CHNS analyser. It was found that carbon content varies significantly depending on plant species, tissue type and the degree of fire impact, reaching a maximum in birch bark (57.37%) and pine branches on burnt areas (56.78%), and a minimum in the roots of herbaceous plants (32.64%). The use of average coefficients (for example, 50% for wood) can lead to errors of up to 10%, which highlights the need for species- and tissue-specific coefficients. Carbon reserves are significantly reduced in fire-disturbed areas: in the undisturbed control plot (SP-3, mature pine forest) they amounted to 76.93 t C/ha, whereas in the heavily disturbed plot (SP-5, following the 2015 crown fire) they were only 32.85 t C/ha. In post-fire dynamics, short-term carbon pools, such as windfall (accounting for 15% of the total stock at SP-5) and branches with an abnormally high carbon content, dominate, accompanied by active recovery of the grass cover but slow accumulation of woody biomass. The key research findings are that fires reduce long-term carbon pools (wood) by 50–80%, birch bark is a critically important carbon reservoir (up to 57.4%), and species-specific coefficients are required rather than standard IPCC values to accurately estimate carbon reserves.

 © Авторы статьи / Authors of the article

Keywords: carbon pools, post-pyrogenic regeneration, forest fires, Baikal Nature Reserve.

Введение

Бореальные леса России, являясь крупнейшим глобальным резервуаром углерода, играют критическую роль в депонировании атмосферного углерода через долговременное накопление органического вещества [8], [9], [12], [17], [19]. Современные исследования [20] подтверждают, что фактический секвестрационный потенциал этих экосистем на 47% превышает предыдущие оценки, что подчеркивает их ключевое значение для глобальной климатической регуляции. В контексте интенсификации климатических изменений и роста пожарной активности устойчивость долгосрочного углеродного депонирования становится стратегической проблемой. Лесные пожары, выступая деструктивным фактором углеродного цикла, не только вызывают мгновенные эмиссии CO_2, но и формируют основу для восстановления пулов углерода в постпирогенных сукцессионных системах. Для России, обладающей крупнейшими лесными массивами мира, точный учет углеродного бюджета имеет стратегическое значение в контексте выполнения климатических обязательств, включая достижение углеродной нейтральности.

Однако растущие риски: старение древостоев, участившиеся лесные пожары, деградация вечной мерзлоты, усиливают вероятность трансформации лесов из поглотителей в источники эмиссии CO_2. Несмотря на значительный прогресс в понимании процессов постпожарного восстановления [7], [21], остаются вопросы относительно оптимальных методов оценки и управления углеродными запасами. Например, исследования [8], [18] показывают, что естественное восстановление лесов может быть эффективным в восстановлении углерода, но вмешательство человека, такое как посадка деревьев и очистка территории, может как ускорять, так и замедлять накопление углерода в зависимости от конкретных условий и методов управления. Кроме того, важным аспектом является учет различных углеродных пулов: живой биомассы, мертвого органического вещества и почвенного углерода, и их динамики в постпирогенный период.

Согласно методологическому подходу В.А. Алексеева и Р.А. Бердси [4], оценка углеродных пулов в лесных фитоценозах базируется на определении запасов фитомассы. Однако на биосферном уровне дефицит стандартизированных данных о структуре, динамике и объемах фитомассы лесной растительности, а также отсутствие унифицированных методов мониторинга [5] ограничивают возможности прогнозирования глобальных экологических изменений. Низкая адекватность моделей углеродных потоков препятствует точной оценке вклада лесов в глобальный углеродный баланс. Для решения этой проблемы требуются детализированные количественные оценки запасов углерода.

Результаты современных исследований указывают, что расчет углеродных запасов для всех видов деревьев на основе унифицированного коэффициента содержания углерода (50%) способен приводить к значительным неточностям, что подтверждает необходимость применения региональных коэффициентов, учитывающих видовые характеристики растительности [15], [16]. В российской системе инвентаризации парниковых газов применяются фиксированные коэффициенты пересчета биомассы (основанные на стандартных таксационных показателях) и рекомендуемые МГЭИК [13] значения для оценки углеродного запаса в биомассе. Подобная методология не учитывает региональные особенности лесных экосистем, что может вызывать существенные отклонения в оценках изменений углеродных запасов как в надземной биомассе, так и в других компонентах углеродного бюджета лесов. Необходима точная информация о количестве углерода, хранящегося в различных типах лесов [2], [14], [15].

Республика Бурятия, с лесистостью 83%, ежегодно теряет до 200 тыс. га леса от пожаров, что ставит под угрозу их функцию основного депонирования углерода и снижает устойчивость экосистем. Особую опасность представляют пожары на территории Прибайкальского заказника (центральная часть Морского хребта), обладающего уникальными экосистемами и охраняемым статусом. Исследуемая территория, примыкающая к озеру Байкал (объект Всемирного наследия ЮНЕСКО), обладает экологической уникальностью, обусловленной как озером, так и прилегающими лесными массивами. Данные экосистемы играют ключевую роль в поддержании экологического баланса посредством регулирования климатических процессов, предотвращения деградации почв и, что критично, очистки вод, поступающих в акваторию Байкала. Территория характеризуется повышенной горимостью относительно сопредельных районов вследствие преобладания пожароопасных светлохвойных пород. Постпирогенное восстановление лесов в условиях засушливого климата Бурятии протекает медленно, с формированием разреженных лиственных насаждений, которые в первые десятилетия не компенсируют углеродные потери. При этом сведения о динамике углеродных пулов в постпирогенных фитоценозах практически отсутствуют.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью оценки влияния постпирогенных сукцессионных процессов на углерододепонирующий потенциал лесных экосистем, учитывая, что естественное восстановление таёжных массивов после пожаров сопровождается трансформацией видовой структуры фитоценозов, что критически влияет на скорость накопления и долгосрочное хранение углерода. Таким образом, цель настоящего исследования — количественная оценка содержания и запасов углерода в основных пулах светлохвойных лесов, на гарях Прибайкальского заказника Республики Бурятия.

Методы и принципы исследования

Прибайкальский заказник (рис. 1) расположен в Прибайкальском районе Республики Бурятия, на восточном побережье озера Байкал, в центральной части Морского хребта (52°30′–52°50′ с.ш., 107°20′–108°00′ в.д.). Его территория примыкает к озеру, протяженность береговой линии составляет около 30 км. Общая площадь заказника — 72 524 га, из которых 93% покрыто лесами. В структуру заказника входит охранная зона шириной 3 км (22 657 га), выполняющая функцию буфера между охраняемыми и хозяйственными территориями.

Согласно лесорастительному районированию, исследуемая территория относится к Восточно-Прибайкальской провинции и характеризуется преобладанием горно-таежных светлохвойных лесов (сосновых и лиственничных) на

 © Авторы статьи / Authors of the article

высотах 550–1200 м над уровнем моря. Исследуемая территория в пределах Кикинского лесничества представлена сосновыми лесами, с древостоями III, IV класса бонитета, с примесью лиственницы, березы, осины.

Климат заказника резко континентальный, но смягченный влиянием оз. Байкал, с выраженными суточными и сезонными колебаниями температур. Среднегодовая температура составляет −1,5 °C. Зимы относительно мягкие, с температурами до −20 °C и обильными снегопадами (высота снежного покрова в горах достигает 1,2 м). Лето прохладное (+14–16 °C), с частыми осадками, годовая сумма которых составляет 400–600 мм, с максимумом в июле–августе.

Гидрологическая сеть заказника представлена реками и ручьями лесного и горного типов, а также тремя крупными озерами (Колок, Большое и Малое Духовое) общей площадью 550 га, имеющими важное рекреационное и экологическое значение.

Основные лесообразующие породы — сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris L.*), лиственница сибирская (*Larix sibirica*), ель и кедр (2–6 % насаждений). Характерной особенностью этих лесов является распространение разнотравных и рододендроновых сосняков на буроземах с высоким содержанием щебня.

Наибольший ущерб экосистемам заказника наносят лесные пожары. В зависимости от типа пожара (низовой, верховой или подземный) повреждаются лесная подстилка, подрост, кроны деревьев или торфяной слой. За период 2013–2024 гг. на территории зафиксировано 25 пожаров, причем наиболее катастрофическим оказался 2015 год, когда огнем было пройдено более 43 тыс. га. Основной причиной возгораний (13 случаев) стали грозы.

Полевые измерения проводились на пробных площадях (ПП) размером 30×30м, на которых изучались различные компоненты биогеоценоза: древостой, подрост, травянистый покров, подстилка и почва по общепринятым в почвоведении и лесоводстве методам. Для почвенных исследований на каждой площадке закладывали 4 прикопки и опорный разрез, где на каждых 10 см определяли плотность и отбирали пробы. Дендрологические исследования включали отбор кернов (с помощью бурава Haglöf) и образцов листьев, ветвей и коры с 5–7 деревьев каждой породы. Также учитывались сухостой и валеж.

Подготовку образцов фитомассы (высушивание, просеивание, взвешивание) проводили в лабораторных условиях. Во всех образцах определяли содержание углерода и азота на автоматическом CHNS-анализаторе (Perkin Elmer) в лаборатории биохимии почв ИОЭБ СО РАН.

Образцы лесной подстилки с ПП отбирались посредством наложения деревянной рамки размером 25х25 см в 10-ти кратной повторности. Для определения массы корней травянистой растительности и кустарничков использовали метод монолитов. Определение запасов стволовой древесины и оценка общих запасов углерода в фитомассе и мортмассе базировалось на данных сплошной перечислительной таксации в пределах организованных пробных площадей (ПП), выполненных согласно Общесоюзным нормативам для таксации лесов (1989). К учету принимались деревья с диаметром ствола 8 и более см, для каждого из которых определяли породу и измерение диаметра на высоте 1,3 м с использованием мерной ленты. Измерение высот проводили с помощью высотомера-эклиметра ЭТ-1П, определение полноты (суммы площадей сечений в древостое) — цепной полнотомер Биттерлиха.

Запас стволовой древесины вычисляли по формуле: $M = \sum G \times Hср \times Fср$,

где M — объем стволовой древесины, $м^3/га$;

$\sum G$ — сумма площадей сечений элемента леса (породы), $м^2/га$;

$H_{ср}$ — средняя высота элемента леса (породы), м;

$F_{ср}$ — среднее видовое число элемента леса (породы), представляющее табличную высоту.

Пулы углерода в фитомассе (т С/га) определялись путем умножения оценок биомассы каждого компонента на их соответствующее содержание углерода. Запасы фитомассы отдельных компонентов древесного яруса рассчитывали на основе данных по запасам стволовой древесины с помощью конверсионных коэффициентов (Уткин и др., 1994) с учетом широтной полосы, породного состава и возраста древостоя для каждой конкретной площадки. Этот коэффициент учитывает различные фракции фитомассы (например, ствол, ветви, хвоя, корни).

 © Авторы статьи / Authors of the article

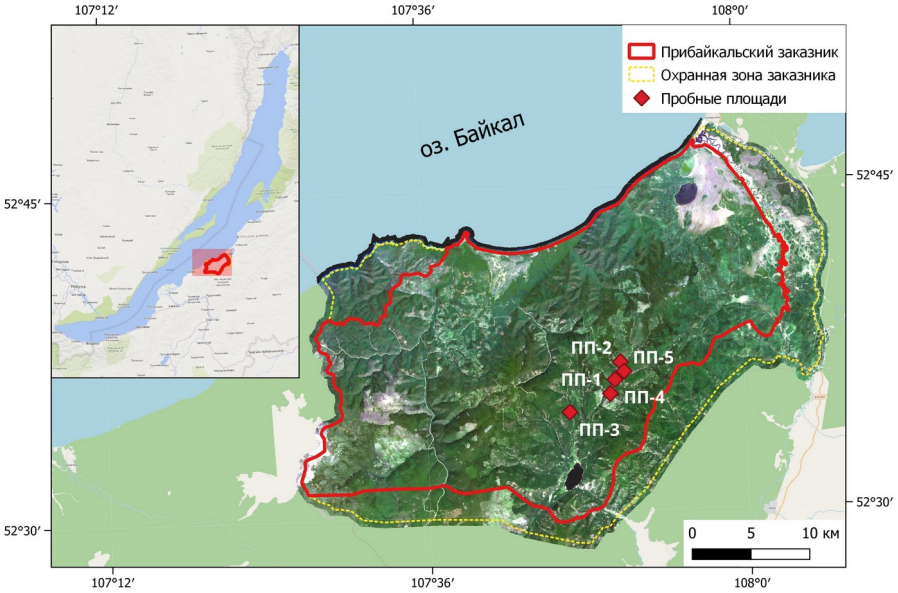

Рисунок 1 - Расположение и границы Прибайкальского заказника и его охранной зоны
DOI: https://doi.org/10.60797/JAE.2026.72.1.1

Основные результаты

Состав и характер развития напочвенного покрова и естественного возобновления на гарях связаны со сроком, прошедшим после пожара, с интенсивностью воздействия огня на почву и растительность, с исходным типом леса. На пробных площадях ПП-1 (сосняк разнотравно-осоковый) и ПП-2 (лиственнично-сосновый разнотравный лес) изучались последствия одного обширного пожара (2015 г). На ПП-1 наблюдались последствия высокоинтенсивного низового пожара, тогда как на ПП-2 воздействие огня было слабовыраженным. ПП-3 (сосняк рододендрово-брусничный) рассматривается как контрольный участок с минимальным пирогенным воздействием. ПП-4 (сосняк разнотравно-вейниково-кипрейный) с выраженными пирогенными повреждениями средней интенсивности. ПП-5 (сосняк вейниково-кипрейный) с сильными пожарными повреждениями (табл. 1).

Таблица 1 - Характер пирогенного воздействия на пробных площадях Прибайкальского заказника

DOI: https://doi.org/10.60797/JAE.2026.72.1.2

№ ПП	Тип леса	Класс пожарной интенсивности	Характеристика пожара	Глубина прогорания	Повреждение древостоя	Послепожарное состояние почвы
1	Сосняк разнотравно-осоковый	Высокая (III класс)	Устойчивый низовой пожар	До 5 см	Полное обгорание коры до 3 м высоты	Частичное выгорание подстилки
2	Лиственнично-сосновый разнотравный	Слабая (I класс)	Беглый низовой пожар	<1 см	Поверхностное опаление коры	Минимальное воздействие
3	Сосняк рододендрово-брусничный	Локальные очаги (II класс)	Точечные высокоинтенсивные вспышки	2-3 см (очагами)	Частичное повреждение нижнего яруса	Пятнистое выгорание
4	Сосняк разнотравно-вейниково-кипрейный	Средняя (II класс)	Равномерный низовой пожар	2-4 см	Одностороннее отслоение коры на 30% деревьев	Умеренное выгорание органогенного слоя
5	Сосняк вейниково-кипрейный	Очень высокая (IV класс)	Верховой пожар с элементами	До 10 см	Полная гибель древостоя	Глубокое выгорание почвенного

 © Авторы статьи / Authors of the article

№ ПП	Тип леса	Класс пожарной интенсивности	Характеристика пожара	Глубина прогорания	Повреждение древостоя	Послепожарное состояние почвы
			устойчивого			профиля

Видовой состав травяной и моховой растительности на гарях однообразен и беден, но не одинаков на участках разных типов лесов (табл. 2). Пробная площадка 1 (ПП-1). Локализована в сосняке разнотравно-осоковом на южном склоне Морского Хребта (Кикинское лесничество) на высоте 645 м н.у.м. Участок подвергся интенсивному устойчивому низовому пожару 4–10 лет назад. Отмечается угнетение возобновления вследствие повторяющихся весенних пожаров различной интенсивности. В травяном ярусе (проективное покрытие до 80%) доминируют лесостепные виды со значительной долей степных элементов, включая *Carex pediformis*, *Calamagrostis langsdorffii* и другие ксерофитные виды.

Таблица 2 - Таксационная характеристика пробных площадей Прибайкальского заказника

DOI: https://doi.org/10.60797/JAE.2026.72.1.3

№ ПП	Тип леса	Формула состава	Возраст, лет	Средний диаметр, см	Средняя высота, м	Густота, шт/га	Класс бонитета	Пол-нота	Запас, м³/га
1	Сосняк разнотравно-осоковый	9С1Л+Б+Ос	50-70	15,0	14,7	850	III-IV	0,6	105
2	Лиственнично-сосновый разнотравный	7С3Л+Б+Ос	60-80 (С) 40-60 (Л)	21,0	15,2	650	II-III	0,7	166
3	Сосняк рододендрово-брусничный (контроль)	7С2Л+Б	80-100	25,0	17,0	720	I-II	0,8	262
4	Сосняк разнотравно-вейниково-кипрейный	8С1Л1Б+Ос	60-80	20,0	16,0	780	II-III	0,75	209
5	Сосняк вейниково-кипрейный	10С+Ос+Б	40-50 4-5 (подрост)	17,0	11,0	400	IV-V	0,4	84

Пробная площадка 2 (ПП-2). Расположена в лиственнично-сосновом разнотравном лесу с участием *Betula sp.* на склонах юго-западной экспозиции (665-700 м н.у.м., крутизна до 20°). После низового пожара слабой интенсивности сохранился разновозрастный древостой. Напочвенный покров разрежен, представлен ксеромезофитным комплексом (*Vicia venosa*, *Sanguisórba officinalis* и др.) на фоне мощного слоя хвойного опада.

Пробная площадка 3 (ПП-3) — контрольная. Заложена в сосняке рододендрово-брусничном (юго-восточная экспозиция, 682 м н.у.м.) с высокосомкнутым древостоем. Подлесок образован *Rhododendron dauricum* с единичными *Rosa acicularis*. В зависимости от давности пожаров проективное покрытие травяно-кустарничкового яруса (представлен мезофитным комплексом *Carex macroura*, *Maianthemum bifolium* и др.) может колебаться от 30 до 70%, по этой же причине большая разница в количестве самосева и всходов сосны, а также в доминантах травостоя.

 © Авторы статьи / Authors of the article

Пробная площадка 4 (ПП-4). Сосняк разнотравно-вейниково-кипрейный с выраженными пирогенными повреждениями средней интенсивности. Наблюдается неравномерное прогорание почвы (проективное покрытие 40–60%) с доминированием *Chamerion angustifolium* и *Calamagrostis langsdorffii*.

Пробная площадка 5 (ПП-5). Сосняк вейниково-кипрейный (северо-восточная экспозиция, 635 м н.у.м.) с сильными пожарными повреждениями. После пожара 2015 г. отмечается стадия кипрейного восстановления (покрытие 50%) с микрогруппировками *Polytrichum spp*. и *Calamagrostis langsdorffii* на фоне обильного валежа.

Обсуждение

4.1. Содержание углерода в компонентах фитомассы

Для оценки углеродных запасов традиционно используются усредненные коэффициенты (50% для древесины, 45% для листвы) [15], [16], однако результаты наших исследований демонстрируют значительную вариабельность концентрации углерода — от 32,64±0,16% до 57,37±0,29%, что зависит от видовой принадлежности, типа тканей и экологических условий произрастания. Применение усредненных коэффициентов может приводить к погрешностям до 10%, что актуализирует необходимость проведения измерений с учетом видовых и тканевых особенностей растений. Такой подход существенно повышает точность оценки углеродных запасов, что особенно важно для корректного мониторинга на региональном и глобальном уровнях.

В целом по всем исследованным породам лесных экосистем Прибайкальского заказника среднее содержание углерода составило 47,96%. Наибольшее содержание углерода отмечено у сосны (48,66%), наименьшее — у берёзы (47,20%). Различия между древесными породами несущественны, что является типичной особенностью для лесообразующих пород. Содержание углерода в основных лесообразующих породах варьировало в зависимости от видовой принадлежности и анатомической части растения в пределах от 42,38±0,21% до 57,37±0,29% в абсолютно сухом веществе. В литературе приводится схожий диапазон содержания углерода в лесных растениях: в среднем 45–53% в абсолютно сухом веществе [21], 42–53% для таежных хвойных [1] и 39–51% для крайнесеверных лесов Республики Коми [3].

Таблица 3 - Содержание органического углерода в компонентах фитомассы на пробных площадях Прибайкальского заказника

DOI: https://doi.org/10.60797/JAE.2026.72.1.4

Компоненты фитомассы	ПП-1, %	ПП-2, %	ПП-3, %	ПП-4, %	ПП-5, %
Сосна					
Древесина	48,30±0,24	48,97±0,24	49,55±0,25	47,62±0,24	48,85±0,24
Кора	53,66±0,27	52,02±0,26	49,35±0,25	51,14±0,26	53,91±0,27
Ветви	—	51,67±0,26	53,45±0,27	51,91±0,26	56,78±0,28
Хвоя	—	48,96±0,24	49,96±0,25	51,31±0,26	49,62±0,25
Лиственница					
Древесина	46,55±0,23	47,22±0,24	49,17±0,25	47,13±0,24	47,84±0,24
Кора	—	—	—	49,89±0,25	—
Ветви	52,47±0,26	50,72±0,25	48,47±0,24	50,68±0,25	53,03±0,27
Хвоя	46,65±0,23	47,27±0,24	47,89±0,24	47,22±0,24	45,49±0,23
Береза					
Древесина	46,09±0,23	49,61±0,25	46,80±0,23	46,53±0,23	46,96±0,23
Кора	57,37±0,29	55,12±0,27	56,29±0,28	54,64±0,27	50,18±0,25
Ветви	53,33±0,27	50,89±0,25	51,55±0,26	50,13±0,25	52,30±0,26
Листья	47,96±0,24	48,01±0,24	42,38±0,21	47,38±0,24	48,85±0,24
Осина					
Древесина	48,19±0,24	49,32±0,25	—	48,12±0,24	48,02±0,24
Кора	46,25±0,23	47,38±0,24	—	47,58±0,24	46,71±0,23
Ветви	48,04±0,24	50,58±0,25	—	49,54±0,25	49,65±0,25
Листья	46,98±0,23	47,24±0,24	—	46,87±0,23	46,45±0,23
Травянистые растения					
Надземная часть	42,96±0,21	43,40±0,22	44,79±0,22	47,07±0,24	43,32±0,22
Подземная часть	32,64±0,16	41,90±0,21	47,48±0,24	41,88±0,21	36,35±0,18
Опад (смешанный)	41,28±0,21	41,98±0,21	46,91±0,23	45,91±0,23	43,32±0,22

 © Авторы статьи / Authors of the article

Наиболее высокие значения концентрации углерода зафиксированы в коре, особенно у берёзы — до 57,37% (ПП-1), что связано с высоким содержанием фенольных соединений, суберина и лигнина, которые являются химически устойчивыми и углеродоемкими веществами. Лигнин обеспечивает механическую прочность, суберин — защиту от патогенов и влаги. У хвойных (сосна, лиственница) кора также богата смолами и фенольными соединениями.

Содержание углерода в ветвях варьирует в пределах 48,04–56,78%, также показывают высокие значения. Содержание углерода в ветвях варьирует в зависимости от их возраста и физиологического состояния. Молодые побеги отличаются повышенным содержанием углерода, что связано с активным ростом и синтезом целлюлозы, которая является основным структурным компонентом развивающихся тканей. Аномально высокое содержание углерода в ветвях сосны на ПП-5 (56,78%) может быть связано с компенсаторным ростом, обусловленным ранее перенесенными повреждениями. Растение направляет ресурсы на восстановление тканей, усиливая синтез углеродсодержащих соединений (целлюлозы, лигнина) для формирования новых структур.

Содержание углерода в древесине стабильно ниже, чем в коре и ветвях, и колеблется в среднем 46–49%. Это соответствует известным значениям для лигноцеллюлозной ткани, в которой преобладают углеводы (целлюлоза и гемицеллюлоза), отличающиеся чуть меньшим удельным содержанием углерода, чем лигнин. Хвойные породы (особенно сосна) в среднем обнаруживают более высокое содержание углерода в древесине и ветвях, чем лиственные (берёза, осина). Например, древесина сосны достигает 49,55% (ПП-3), тогда как у берёзы — 46,09% (ПП1). Это может быть связано с более высокой долей смол, лигнина и плотных механических тканей, характерных для хвойных пород. Осина характеризуется более низким содержанием углерода во всех частях по сравнению с другими деревьями, особенно в коре и листьях (около 46%), что обусловлено более рыхлой структурой тканей, меньшей долей защитных и опорных элементов, и, возможно, повышенной зольностью.

Концентрация углерода в листьях и хвое составляет 45–51%, что связано с их анатомо-химическим составом. Активный фотосинтез — накопление углеводов (глюкоза, крахмал), у хвойных — дополнительное накопление терпенов и смол. Помимо углеродсодержащих соединений, такие органы содержат значительное количество воды, пигментов и зольных элементов, что снижает относительное содержание углерода.

Надземные части трав имеют сравнительно низкое содержание углерода (42,96–47,07%), что объясняется высоким содержанием зольных элементов, воды, а также меньшей степенью одревеснения. Корни трав демонстрируют ещё более низкие значения (32,64–47,48%), в основном за счёт более рыхлой структуры тканей, меньшего содержания лигнина и высокого содержания минеральных веществ из почвы. Содержание углерода в опаде колеблется от 41,28% до 46,91%, что отражает его смешанный состав — частично разложившиеся листья, мелкие веточки, хвоя и трава. После пожара увеличивается доля обугленных остатков, богатых углеродом.

Различия в накоплении углерода между частями растений и породами обусловлены:

1) биохимическим составом тканей (лигнин, целлюлоза, зольные элементы);

2) функциональной ролью органа (защитные ткани имеют больше углерода);

3) физиологическими и экологическими особенностями древесных пород (хвойные/лиственные);

4) степенью минерализации и плотностью тканей (особенно для подземных частей и опада).

Полученные данные позволят точнее учитывать распределение углерода в экосистемах и использовать их при моделировании углеродного баланса лесов.

4.2. Запасы углерода по компонентам фитомассы

Углеродоемкость древостоев исследованных насаждений Прибайкальского заказника существенно изменяется в зависимости от типа леса, возраста и интенсивности воздействия огня. Наиболее углеродаккумулирующей структурой является стволовая древесина, во всех ПП древесина выступает доминирующим компонентом, формируя 73–75% общего пула углерода, что свидетельствует о ее ключевой роли в процессах долгосрочной секвестрации. Запасы углерода древесного яруса максимальны на ПП-3 (48,68 т/га), минимум на ПП-5 (15,39 т/га), что типично для зрелых лесов, где стволы деревьев формируют основную биомассу. К схожим выводам приходит Уткин с соавторами [6], при исследовании запасов углерода в сосновых насаждениях естественного происхождения, отмечая, что светолюбие сосны, следствием которого является хорошее очищение стволов от сучьев, обусловливает приоритет стволов и корней в накоплении углерода, при незначительном участии в этом процессе крон деревьев.

Ветви и хвоя имеют близкие количественные значения запасов углерода и схожую структуру дифференциации по лесотипологическому градиенту, занимая второстепенное положение по углеродному пулу после стволовой древесины. Вклад ветвей (12–14%) и хвои (листвы) (4–7%) от древесины пропорционален запасу древесины и их соотношение соответствует биологическим закономерностям роста деревьев. Доля углерода, связанного данными фракциями надземной фитомассы, уменьшается от наименее продуктивного сосняка вейниково-кипрейного к более производительному сосняку рододендрово-брусничному. Предположительно, такой характер распределения углеродных пулов в древесном ярусе изученных сосняков обусловливается общими закономерностями биопродукционного процесса древостоев, в разных экологических условиях под влиянием пирогенного фактора. На ПП-3, который рассматривается как фоновый вариант с минимальным пирогенным воздействием интенсивность физиологических процессов в древесных растениях выше, за равный промежуток времени они достигают больших размеров по сравнению с деревьями, которые подверглись влиянию пожаров в той или иной степени. Поэтому скелетный блок древостоя для обеспечения надежного поддержания кроны и тока веществ наращивает свои пропорции по отношению к фотосинтезирующему аппарату.

Доля стволовой коры в общем пуле надземной фитомассы древостоев исследованных сосняков имеет тенденцию к снижению от сосняка вейниково-кипрейного и разнотравно-осокового к сосняку рододендрово-брусничному, которые в большей степени пострадали от пожаров.

 © Авторы статьи / Authors of the article

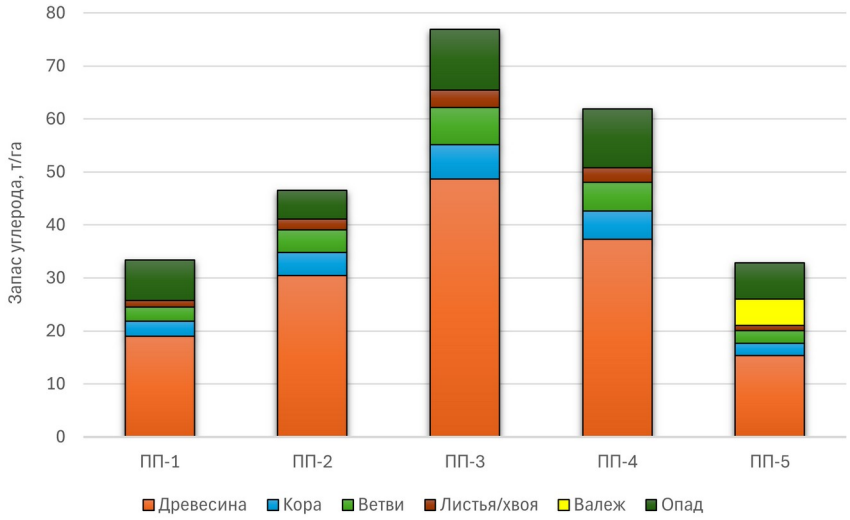

Рисунок 2 - Запасы углерода на пробных площадях Прибайкальского заказника
DOI: https://doi.org/10.60797/JAE.2026.72.1.5

Опад (подстилка) следующий по важности компонент (15–24% от общего запаса). Наибольший запас на ПП-3 (11,52 т/га), наименьший на ПП-2 (5,45), что указывает на активный процесс накопления органики в почве. В исследованных пробных площадках на отмершую часть древостоев (валеж) приходится 4,9 т/га или 15% от общего запаса. Наличие валежа зафиксировано только на ПП-5, что свидетельствует о недавнем отмирании деревьев вследствие интенсивно пожара.

Таким образом с улучшением экологических условий произрастания запасы углерода в компонентах надземной фитомассы древесного яруса сосняков возрастают. ПП-3 выделяется максимальными запасами по всем компонентам (76,93 т/га), что свидетельствует о высокой продуктивности, зрелости и ненарушенности леса. ПП-5, подвергшийся высокой степени пирогенной трансформации, имеет минимальные показатели (32,85 т/га), с учетом валежа и низковозрастной структуры сохранившегося древостоя. ПП-2 (лиственично-сосновый разнотравный лес) демонстрирует необычно низкую величину опада, при высокой биомассе древесины, что может указывать на интенсивную минерализацию подстилки.

Несмотря на значительные различия между отдельными пробными площадками, общая структура распределения фитомассы в экосистеме на данной территории характеризуется ярко выраженным доминированием древесины (около 60%) и значительной долей опада (около 17%). Надземные части кроны (кора, ветви, листва) в сумме составляют около пятой части запасов. Валеж, хотя и присутствует не везде, является важным, но обычно менее массивным компонентом, играющим ключевую роль в биоразнообразии и круговороте веществ при локальных нарушениях (пожарах) или на поздних стадиях сукцессии. Значительная доля опада подчеркивает важность почвенных процессов и деструкции в функционировании этой экосистемы.

Заключение

На основе комплексного анализа запасов фитомассы и содержания углерода по компонентам и породам можно сделать следующие общие выводы. Лесные экосистемы Прибайкальского заказника демонстрируют типичную для бореальных лесов структуру углеродных пулов, в которой ведущая роль принадлежит стволовой древесине. Пожары радикально меняют структуру углеродных запасов, снижают долгосрочные пулы (древесина). Формируют краткосрочные резервуары (валеж, ветви с высоким содержанием углерода). Низкая биомасса древесины и наличие валежа – прямые последствия пожара 10-летней давности. Относительно высокие запасы опада, ветвей и листвы указывают на активное развитие молодого древостоя и пионерной растительности. Таким образом, эффективное управление лесами должно учитывать возрастные особенности древостоев и экологические условия произрастания с целью повышения их климаторегулирующей функции.

 © Авторы статьи / Authors of the article

Финансирование

Исследования выполнены при поддержке гранта РНФ № 24-24-20098 (https://rscf.ru/project/24-24-20098/).

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Funding

The research was carried out with the support of a grant from the Russian Science Foundation (No. 24-24-20098; https://rscf.ru/project/24-24-20098/).

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Бобкова К.С. Содержание углерода и калорийность органического вещества в лесных экосистемах Севера / К.С. Бобкова, В.В. Тужилкина // Экология. — 2001. — № 1. — С. 69–74.

2. Наквасина Е.Н. Динамика запасов углерода при формировании лесов на постагрогенных землях / Е.Н. Наквасина, Ю.Н. Шумилова // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. — 2021. — № 1. — С. 46–59. — DOI: 10.37482/0536-1036-2021-1-46-59.

3. Пристова Т.А. Продукция органического вещества и аккумуляция углерода в напочвенном покрове еловых и березовых фитоценозов в предгорьях Приполярного Урала / Т.А. Пристова, С.В. Загирова, А.В. Манов // Теоретическая и прикладная экология. — 2018. — № 2. — С. 53–61. — DOI: 10.25750/1995-4301-2018-2-053/2-061.

4. Углерод в экосистемах лесов и болот России / под ред. В.А. Алексеева, Р.А. Бердси. — Красноярск : ИЛ СО РАН, 1994. — 224 с.

5. Усольцев В.А. Фитомасса лесов Северной Евразии: база данных и география / В.А. Усольцев. — Екатеринбург : УрО РАН, 2001. — 707 с.

6. Уткин А.И. Определение запасов углерода насаждений на пробных площадях: сравнение аллометрического и конверсионно-объемного методов / А.И. Уткин, Д.Г. Замолодчиков, Г.Н. Коровин [и др.] // Лесоведение. — 1997. — № 5. — С. 51–66.

7. Bousquet E. Monitoring post-fire recovery of various vegetation biomes using multi-wavelength satellite remote sensing / E. Bousquet, A. Mialon, N. Rodriguez-Fernandez [et al.] // Biogeosciences. — 2022. — Vol. 19, № 13. — P. 3317–3336. — DOI: 10.5194/bg-19-3317-2022.

8. Cerny J. Air Temperature Is the Main Driving Factor of Radiation Use Efficiency and Carbon Storage of Mature Norway Spruce Stands under Global Climate Change / J. Cerny, R. Pokorny, M. Vejpustkova [et al.] // International Journal of Biometeorology. — 2020. — Vol. 64, Iss. 9. — P. 1599–1611. — DOI: 10.1007/s00484-020-01941-w.

9. Clason A.J. Carbon 5–60 Years After Fire: Planting Trees Does Not Compensate for Losses in Dead Wood Stores / A.J. Clason, I. Farnell, E.B. Lilles // Frontiers in Forests and Global Change. — 2022. — Vol. 5. — DOI: 10.3389/ffgc.2022.868024.

10. Dar J.A. Variation of Biomass and Carbon Pools with Forest Type in Temperate Forests of Kashmir Himalaya, India / J.A. Dar, S. Sundarapandian // Environmental Monitoring and Assessment. — 2015. — Vol. 187, Iss. 2. — DOI: 10.1007/s10661-015-4299-7.

11. Di Sacco A. Ten golden rules for reforestation to optimize carbon sequestration, biodiversity recovery and livelihood benefits / A. Di Sacco, K.A. Hardwick, D. Blakesley [et al.] // Global Change Biology. — 2021. — Vol. 27, № 7. — P. 1328–1348. — DOI: 10.1111/gcb.15498.

12. Jandl R. How Strongly can Forest Management Influence Soil Carbon Sequestration? / R. Jandl, M. Lindner, L. Vesterdal [et al.] // Geoderma. — 2007. — Vol. 137, iss. 3-4. — P. 253–268. — DOI: 10.1016/j.geoderma.2006.09.003.

13. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories / ed. by H.S. Eggleston, L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara, K. Tanabe. — Kanagawa : IGES, 2006.

14. Khan A. Tree Distribution Pattern, Growing Stock Characteristics and Biomass Carbon Density of Mongolian Scots pine (Pinus Sylvestris var Mongolica) Plantation of Horqin Sandy Land, China / A. Khan, X. Zhang, K. Zhang [et al.] // Pakistan Journal of Botany. — 2020. — Vol. 52, Iss. 3. — P. 995–1002. — DOI: 10.30848/PJB2020-3(26).

15. Lamlom S.H. A reassessment of carbon content in wood: variation within and between 41 North American species / S.H. Lamlom, R.A. Savidge // Biomass and Bioenergy. — 2003. — Vol. 25, № 4. — P. 381–388. — DOI: 10.1016/S0961-9534(03)00033-3.

16. Ma S. Variations and determinants of carbon content in plants: a global synthesis / S. Ma, F. He, D. Tian [et al.] // Biogeosciences. — 2018. — Vol. 15, № 3. — P. 693–702. — DOI: 10.5194/bg-15-693-2018.

17. Malmsheimer R.W. Managing Forests because Carbon Matters: Integrating Energy, Products, and Land Management Policy / R.W. Malmsheimer, J.L. Bowyer, J.S. Fried [et al.] // Journal of Forestry. — 2011. — Vol. 109. — P. 7–51.

18. Powers E.M. Post-fire management regimes affect carbon sequestration and storage in a Sierra Nevada mixed conifer forest / E.M. Powers, J.D. Marshall, J. Zhang [et al.] // Forest Ecology and Management. — 2013. — Vol. 291. — P. 268–277. — DOI: 10.1016/j.foreco.2012.07.038.

19. Pohjola J. Carbon Credits and Management of Scots pine and Norway Spruce Stands in Finland / J. Pohjola, L. Valsta // Forest Policy and Economics. — 2007. — Vol. 9, Iss. 7. — P. 789–798. — DOI: 10.1016/j.forpol.2006.03.012.

 © Авторы статьи / Authors of the article

20. Schepaschenko D. Russian forest sequesters substantially more carbon than previously reported / D. Schepaschenko, E. Moltchanova, S. Fedorov [et al.] // Scientific Reports. — 2021. — Vol. 11. — P. 12825. — DOI: 10.1038/s41598-021-92152-9.

21. Zamolodchikov D.G. A twenty year retrospective on the forest carbon dynamics in Russia / D.G. Zamolodchikov, V.I. Grabovskii, G.N. Kraev // Contemporary Problems of Ecology. — 2011. — Vol. 4, № 7. — P. 706–715. — DOI: 10.1134/S1995425511070022.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Bobkova K.S. Soderzhaniye ugleroda i kaloriynost' organicheskogo veshchestva v lesnykh ekosistemakh Severa [Carbon content and caloric value of organic matter in forest ecosystems of the North] / K.S. Bobkova, V.V. Tuzhilkina // Ekologiya [Ecology]. — 2001. — № 1. — P. 69–74. [in Russian]

2. Nakvasina E.N. Dinamika zapasov ugleroda pri formirovanii lesov na postagrogennykh zemlyakh [Dynamics of carbon stocks in the formation of forests on post-agrogenic lands] / E.N. Nakvasina, Yu.N. Shumilova // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Lesnoy zhurnal [Proceedings of Universities. Forest Journal]. — 2021. — № 1. — P. 46–59. — DOI: 10.37482/0536-1036-2021-1-46-59. [in Russian]

3. Pristova T.A. Produktsiya organicheskogo veshchestva i akkumulyatsiya ugleroda v napochvennom pokrove elovykh i berezovykh fitotsenozov v predgor'yakh Pripolyarnogo Urala [Production of organic matter and carbon accumulation in the ground cover of spruce and birch phytocenoses in the foothills of the Subpolar Urals] / T.A. Pristova, S.V. Zagirova, A.V. Manov // Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya [Theoretical and Applied Ecology]. — 2018. — № 2. — P. 53–61. — DOI: 10.25750/1995-4301-2018-2-053/2-061. [in Russian]

4. Uglerod v ekosistemakh lesov i bolot Rossii [Carbon in forest and wetland ecosystems of Russia] / ed. by V.A. Alekseev, R.A. Birdsy. — Krasnoyarsk : V.N. Sukachev Institute of Forest SB RAS, 1994. — 224 p. [in Russian]

5. Usoltsev V.A. Fitomassa lesov Severnoy Yevrazii: baza dannykh i geografiya [Phytomass of forests of Northern Eurasia: database and geography] / V.A. Usoltsev. — Yekaterinburg : Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2001. — 707 p. [in Russian]

6. Utkin A.I. Opredeleniye zapasov ugleroda nasazhdeniy na probnykh ploshchadyakh: sravneniye allometricheskogo i konversionno-ob"yemnogo metodov [Determination of carbon stocks of stands on sample plots: comparison of allometric and conversion-volume methods] / A.I. Utkin, D.G. Zamolodchikov, G.N. Korovin [et al.] // Lesovedeniye [Russian Forest Science]. — 1997. — № 5. — P. 51–66. [in Russian]

7. Bousquet E. Monitoring post-fire recovery of various vegetation biomes using multi-wavelength satellite remote sensing / E. Bousquet, A. Mialon, N. Rodriguez-Fernandez [et al.] // Biogeosciences. — 2022. — Vol. 19, № 13. — P. 3317–3336. — DOI: 10.5194/bg-19-3317-2022.

8. Cerny J. Air Temperature Is the Main Driving Factor of Radiation Use Efficiency and Carbon Storage of Mature Norway Spruce Stands under Global Climate Change / J. Cerny, R. Pokorny, M. Vejpustkova [et al.] // International Journal of Biometeorology. — 2020. — Vol. 64, Iss. 9. — P. 1599–1611. — DOI: 10.1007/s00484-020-01941-w.

9. Clason A.J. Carbon 5–60 Years After Fire: Planting Trees Does Not Compensate for Losses in Dead Wood Stores / A.J. Clason, I. Farnell, E.B. Lilles // Frontiers in Forests and Global Change. — 2022. — Vol. 5. — DOI: 10.3389/ffgc.2022.868024.

10. Dar J.A. Variation of Biomass and Carbon Pools with Forest Type in Temperate Forests of Kashmir Himalaya, India / J.A. Dar, S. Sundarapandian // Environmental Monitoring and Assessment. — 2015. — Vol. 187, Iss. 2. — DOI: 10.1007/s10661-015-4299-7.

11. Di Sacco A. Ten golden rules for reforestation to optimize carbon sequestration, biodiversity recovery and livelihood benefits / A. Di Sacco, K.A. Hardwick, D. Blakesley [et al.] // Global Change Biology. — 2021. — Vol. 27, № 7. — P. 1328–1348. — DOI: 10.1111/gcb.15498.

12. Jandl R. How Strongly can Forest Management Influence Soil Carbon Sequestration? / R. Jandl, M. Lindner, L. Vesterdal [et al.] // Geoderma. — 2007. — Vol. 137, iss. 3-4. — P. 253–268. — DOI: 10.1016/j.geoderma.2006.09.003.

13. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories / ed. by H.S. Eggleston, L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara, K. Tanabe. — Kanagawa : IGES, 2006.

14. Khan A. Tree Distribution Pattern, Growing Stock Characteristics and Biomass Carbon Density of Mongolian Scots pine (Pinus Sylvestris var Mongolica) Plantation of Horqin Sandy Land, China / A. Khan, X. Zhang, K. Zhang [et al.] // Pakistan Journal of Botany. — 2020. — Vol. 52, Iss. 3. — P. 995–1002. — DOI: 10.30848/PJB2020-3(26).

15. Lamlom S.H. A reassessment of carbon content in wood: variation within and between 41 North American species / S.H. Lamlom, R.A. Savidge // Biomass and Bioenergy. — 2003. — Vol. 25, № 4. — P. 381–388. — DOI: 10.1016/S0961-9534(03)00033-3.

16. Ma S. Variations and determinants of carbon content in plants: a global synthesis / S. Ma, F. He, D. Tian [et al.] // Biogeosciences. — 2018. — Vol. 15, № 3. — P. 693–702. — DOI: 10.5194/bg-15-693-2018.

17. Malmsheimer R.W. Managing Forests because Carbon Matters: Integrating Energy, Products, and Land Management Policy / R.W. Malmsheimer, J.L. Bowyer, J.S. Fried [et al.] // Journal of Forestry. — 2011. — Vol. 109. — P. 7–51.

18. Powers E.M. Post-fire management regimes affect carbon sequestration and storage in a Sierra Nevada mixed conifer forest / E.M. Powers, J.D. Marshall, J. Zhang [et al.] // Forest Ecology and Management. — 2013. — Vol. 291. — P. 268–277. — DOI: 10.1016/j.foreco.2012.07.038.

19. Pohjola J. Carbon Credits and Management of Scots pine and Norway Spruce Stands in Finland / J. Pohjola, L. Valsta // Forest Policy and Economics. — 2007. — Vol. 9, Iss. 7. — P. 789–798. — DOI: 10.1016/j.forpol.2006.03.012.

 © Авторы статьи / Authors of the article

20. Schepaschenko D. Russian forest sequesters substantially more carbon than previously reported / D. Schepaschenko, E. Moltchanova, S. Fedorov [et al.] // Scientific Reports. — 2021. — Vol. 11. — P. 12825. — DOI: 10.1038/s41598-021-92152-9.

21. Zamolodchikov D.G. A twenty year retrospective on the forest carbon dynamics in Russia / D.G. Zamolodchikov, V.I. Grabovskii, G.N. Kraev // Contemporary Problems of Ecology. — 2011. — Vol. 4, № 7. — P. 706–715. — DOI: 10.1134/S1995425511070022.