

СТАТЬЯ

УДК 630*52
DOI 10.17513/use.38466

ПУЛЫ УГЛЕРОДА В ЭКОСИСТЕМАХ ПРИБАЙКАЛЬСКОГО ЗАКАЗНИКА ПОСЛЕ ПОЖАРОВ

Мильхеев Е.Ю. ORCID ID 0000-0002-9949-4703,
Чимитдоржиева Г.Д. ORCID ID 0000-0001-8566-3994

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт общей и экспериментальной биологии Сибирского отделения Российской академии наук, Улан-Удэ, Российская Федерация, e-mail: evgmilh@gmail.com

Проблема трансформации углеродных пулов в лесных экосистемах под влиянием пожаров важна для понимания глобального цикла углерода. Цель исследования – количественная оценка запасов углерода и анализ их распределения по компонентам фитомассы в светлохвойных лесах Прибайкалья, нарушенных многократными пирогенными воздействиями. Материалы и методы включали закладку пробных площадей на участках с разной степенью пирогенной нагрузки, детальный учет фитомассы и определение содержания углерода в растительных тканях с помощью элементного анализа. В результате установлено, что концентрация углерода существенно различается между видами растений и типами их тканей, причем максимальные значения выявлены в коре лиственных пород и ветвях хвойных пород на горячих. Показано, что применение усредненных коэффициентов для пересчета биомассы в запас углерода приводит к значительной погрешности. Общий запас углерода в экосистеме резко снижается на интенсивно нарушенных пожарами территориях по сравнению с ненарушенными лесами. Восстановительная сукцессия после пожара характеризуется преобладанием кратковременных пулов углерода, таких как валеж и ветви, при активном зарастании травами и замедленном восстановлении древостоя. Таким образом, пожары не только значительно сокращают общие запасы углерода, но и качественно изменяют структуру его пулов, смещающая баланс в сторону менее стабильных компонентов, что необходимо учитывать при региональной оценке углеродного бюджета и планировании восстановительных мероприятий.

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

CARBON POOLS IN THE ECOSYSTEMS OF THE PRIBAIKALSKY NATURE RESERVE AFTER FIRES

Milkheev E.Yu. ORCID ID 0000-0002-9949-4703,
Chimitdorzhieva G.D. ORCID ID 0000-0001-8566-3994

Federal State Budgetary Institution of Sciences Institute of General and Experimental Biology of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Ulan-Ude, Russian Federation, e-mail: evgmilh@gmail.com

The transformation of carbon pools in forest ecosystems under the influence of fires is important for understanding the global carbon cycle. The aim of this study was to quantify carbon stocks and analyze their distribution among phytomass components in light coniferous forests of the Baikal region disturbed by repeated pyrogenic events. The materials and methods included establishing sample plots in areas with varying degrees of pyrogenic load, detailed phytomass recording, and determining the carbon content of plant tissues using elemental analysis. Results revealed that carbon concentrations vary significantly between plant species and tissue types, with the highest values observed in the bark of deciduous trees and branches of conifers in burned areas. It was shown that the use of averaged coefficients for converting biomass to carbon stocks leads to significant errors. The total carbon stock in the ecosystem decreases sharply in areas intensively disturbed by fires compared to undisturbed forests. Post-fire restoration succession is characterized by a predominance of short-lived carbon pools, such as fallen trees and branches, with active grass growth and slower stand regeneration. Thus, fires not only significantly reduce overall carbon stocks but also fundamentally alter the structure of these pools, shifting the balance toward less stable components. This must be taken into account when assessing regional carbon budgets and planning restoration efforts.

Keywords: carbon pools, post-pyrogeic restoration, forest fires, Pribaikalsky Reserve

Введение

Бореальные леса России представляют собой крупнейший глобальный резервуар углерода, играя ключевую роль в долговременной секвестрации атмосферного углерода посредством аккумуляции органического вещества [1–3]. Современные данные [4] свидетельствуют, что реальный секве-

страционный потенциал данных экосистем на 47% превышает ранние оценки, что подтверждает их исключительную важность для глобальной климатической регуляции.

Несмотря на прогресс в изучении постпожарного восстановления [5, 6], остаются дискуссионными вопросы, касающиеся оптимальных методов оценки и управления

углеродными запасами. Исследования [1, 7] показывают, что естественное лесовосстановление может быть эффективным для секвестрации углерода, в то время как антропогенные вмешательства (лесовосстановление, расчистка территории) способны как ускорить, так и замедлить этот процесс в зависимости от конкретных условий и применяемых методов. Существенную сложность представляет также комплексный учет динамики различных углеродных пулов: живой биомассы, мертвого органического вещества и почвенного углерода в постпирогенный период.

Современные исследования подтверждают, что расчет углеродных запасов для всех видов деревьев с использованием универсального коэффициента (50%) может приводить к значительным погрешностям, что подчеркивает необходимость применения региональных коэффициентов, учитывающих видовую специфику растительности [8]. В российской системе инвентаризации парниковых газов используются фиксированные коэффициенты пересчета биомассы (основанные на таксационных показателях) и рекомендованные МГЭИК значения. Подобный подход не учитывает региональные особенности лесных экосистем, что может вызывать существенные отклонения в оценках изменений углеродных запасов как в надземной биомассе, так и в иных компонентах углеродного бюджета. Для повышения точности необходимы детальные данные о количестве углерода, депонированного в различных типах лесов [2, 9, 10].

Республика Бурятия, обладающая лесистостью 83%, ежегодно теряет до 200 тыс. га лесов в результате пожаров, что ставит под угрозу их функцию как основного депонирующего пула углерода и снижает устойчивость экосистем. Особую опасность представляют пожары на территории Прибайкальского заказника (центральная часть Морского хребта), отличающегося уникальными экосистемами и охранным статусом. Исследуемый регион, прилегающий к объекту Всемирного наследия ЮНЕСКО – оз. Байкал, обладает высокой экологической значимостью, обусловленной ролью в климатической регуляции, предотвращении деградации почв и, что критично, в очистке вод, поступающих в байкальскую акваторию. Территория характеризуется повышенной горимостью 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 данные о динамике углеродных пулов в постпирогенных фитоценозах данного региона практически отсутствуют.

Цель исследования – количественная оценка содержания и запасов углерода в основных пулах светлохвойных лесов на гряжах Прибайкальского заказника Республики Бурятия.

Материалы и методы исследования

Прибайкальский заказник расположен в Прибайкальском районе Республики Бурятия, на восточном побережье оз. Байкал, в центральной части Морского хребта ($52^{\circ}30' - 52^{\circ}50'$ с.ш., $107^{\circ}20' - 108^{\circ}00'$ 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-тажевых светлохвойных лесов (сосновых и лиственничных) на высотах 550–1200 м над ур. м. 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 $-1,5^{\circ}\text{C}$. Зимы относительно мягкие, с температурами до -20°C и обильными снегопадами (высота снежного покрова в горах достигает 1,2 м). Лето прохладное ($+14 - 16^{\circ}\text{C}$), 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).

В исследуемых лесных фитоценозах выделяются следующие элементы. Подрост представлен молодым поколением основных древесных пород (сосна обыкновенная, лиственница сибирская, береза и осина). В подлеске встречаются рододендрон даурский и шиповник иглистый. Живой напочвенный покров сформирован преимущественно злаковыми, реже бобовыми травами, а в понижениях рельефа – галофитными лугами и зарослями ивы. На территории исследований распространены разнотравные и рододендроновые сосняки на бурых лесных (буровоземных) почвах, характеризующихся высокой каменистостью (обилием грубообломочного материала).

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 2013–2024 гг. на территории зафиксировано 25 пожаров, причем наиболее катастрофическим оказался 2015 г., когда огнем было пройдено более 43 тыс. га. Основной причиной возгораний (13 случаев) стали грозы.

Полевые измерения проводились на пробных площадях (ПП) размером 30×30 м, 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 четыре прикопки и опорный разрез, где на каждого 10 см определяли плотность и отбирали пробы. Дендрологические исследования включали отбор кернов (с помощью бурава Haglöf) и образцов листьев, ветвей и коры с пяти-семи 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 25×25 см в 10-кратной повторности. Для определения массы корней травянистой растительности и кустарничков использовали метод монолитов. Углерод-

ный бюджет на ПП изучен по биопродуктивности. Массу и прирост органического вещества древесных растений определяли методом модельных деревьев [11, 12]. Проанализировано по 10 модельных деревьев на каждой пробной площади. Массу стволов сухостоя, валежа вычисляли по их объему и базисной плотности древесины. Содержание углерода в древесных растениях вычисляли на основании полученных авторами данных фитомассы и концентрации углерода в отдельных ее фракциях.

Результаты исследования и их обсуждение

Структура и динамика живого напочвенного покрова и естественного лесовосстановления на гарях детерминированы временем, прошедшим после пожара, интенсивностью воздействия огня на почвенно-растительный комплекс, а также исходным типом леса. В рамках исследования заложены пять пробных площадей (ПП), отражающих градиент пирогенного воздействия: ПП-1 и ПП-2 представляют последствия одного обширного пожара 2015 г. в разных условиях: на ПП-1 (сосняк разнотравно-осоковый) зафиксированы последствия высокоинтенсивного низового пожара, тогда как на ПП-2 (лиственнично-сосnovый разнотравный лес) воздействие было слабоинтенсивным. ПП-3 (сосняк рододендрово-брусничный) служит контрольным участком с минимальным пирогенным воздействием. ПП-4 (сосняк разнотравно-вейниково-кипрейный) характеризуется повреждениями средней интенсивности. ПП-5 (сосняк вейниково-кипрейный) представляет участок с сильнейшими пожарными повреждениями.

Таксационная характеристика древостоев на исследованных пробных площадях (ПП) представлена в табл. 1. Для сравнения в качестве контроля (ПП3) взята территория спелого сосняка, не затронутого пожарами в последние десятилетия.

Пробная площадь 1 (ПП-1). Заложена в сосняке разнотравно-осоковом на южном склоне Морского хребта (645 м над ур. м.). Участок подвергся интенсивному устойчивому низовому пожару 4–10 лет назад. Отмечается угнетение естественного возобновления вследствие повторяющихся весенних палов. Травяной ярус (проективное покрытие до 80%) образован лесостепными видами с участием ксерофитных элементов: *Carex pediformis*, *Calamagrostis langsdorffii* и др.

Таблица 1

Таксационная характеристика пробных площадей Прибайкальского заказника

№ ПП	Тип леса	Формула состава	Возраст, лет	Средний диаметр, см	Средняя высота, м	Густота, шт./га	Класс бонитета	Полнота	Запас, м ³ /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

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования

Пробная площадь 2 (ПП-2). Расположена в лиственнично-сосновом разнотравном лесу с участием *Betula* sp. на склонах юго-западной экспозиции (665–700 м над ур. м.). После низового пожара слабой интенсивности сохранился разновозрастный древостой. Напочвенный покров разрежен, представлен ксеромезофитным комплексом (*Vicia venosa*, *Sanguisorba officinalis* и др.) на фоне мощного слоя хвойного опада.

Пробная площадь 3 (ПП-3, контроль). Заложена в сосняке рододендрово-брусничном (юго-восточная экспозиция, 682 м над ур. м.) с высокосомкнутым древостоем. Подлесок образован *Rhododendron dauricum* с единичными *Rosa acicularis*. В зависимости от давности локальных пожаров проективное покрытие травяно-кустарникового яруса (мезофитный комплекс: *Carex macrostachys*, *Maianthemum bifolium* и др.) варьирует от 30 до 70 %, что также обуславливает значительную изменчивость в количестве подроста сосны и доминантах травостоя.

Пробная площадь 4 (ПП-4). Сосняк разнотравно-вейниково-кипрейный с выраженным повреждениями средней интенсивности. Наблюдается мозаичное прогорание почвы. Проективное покрытие травяного яруса составляет 40–60 % с доминированием *Chamerion angustifolium* и *Calamagrostis langsdorffii*.

Пробная площадь 5 (ПП-5). Сосняк вейниково-кипрейный (северо-восточная экспозиция, 635 м над ур. м.) с сильнейшими пожарными повреждениями. Гибель 95–100 % древостоя, полное выгорание подстилки и верхнего органического горизонта почвы. Оставшийся древостой представляет собой сухостой. После пожара 2015 г. участок находится на стадии кипрейного восстановления (покрытие ~50 %) с микрогруппировками *Polytrichum spp.* и *Calamagrostis langsdorffii* на фоне обильного валежа.

Содержание углерода в компонентах фитомассы

В настоящее время оценка углеродных запасов часто опирается на использование усредненных коэффициентов (например, 50 % для древесины, 45 % для листьев) [8]. Однако данные настоящего исследования выявили значительную вариабельность концентрации углерода в растительных тканях – от 32,64±0,16 до 57,37±0,29 % (табл. 2). Эта вариативность обусловлена видовой принадлежностью, типом тканей и экологическими условиями. Применение обобщенных коэффициентов может приводить к погрешности оценок до 10 %, что подтверждает необходимость перехода к видово- и тканеспецифичным коэффициентам для повышения точности регионального и глобального мониторинга углерода.

Среднее содержание углерода по всем исследованным породам в лесных экосистемах Прибайкальского заказника составило 47,96 %. Наибольшие значения отмечены у сосны (48,66 %), наименьшие – у березы (47,20 %). Различия между основными древесными породами статистически невелики, что характерно для таежных видов. Общий диапазон содержания углерода в абсолютно сухом веществе составил $42,38 \pm 0,21$ – $57,37 \pm 0,29$ %, что согласуется с литературными данными: в среднем 45–53 % [13], 42–53 % для таежных хвойных [14] и 39–51 % для лесов Республики Коми [15].

Выявлены следующие закономерности распределения углерода в растительных тканях. Кора показала максимальные значения концентрации углерода, особенно у березы – до 57,37 % (ПП-1). Это объясняется

высоким содержанием углеродоемких и химически устойчивых соединений: лигнина, суберина и фенольных веществ, выполняющих защитную функцию. У хвойных пород кора также обогащена смолами и фенолами.

Ветви характеризуются широким диапазоном содержания углерода (48,04–56,78 %), демонстрируя высокие значения. Это связано с преобладанием лигнифицированных механических и проводящих тканей. Концентрация углерода зависит от возраста и физиологического состояния ветви: молодые растущие побеги активно синтезируют целлюлозу, а зрелые – накапливают лигнин. Аномально высокое значение на ПП-5 (56,78 % у сосны) может быть результатом компенсаторного роста и усиленного синтеза структурных полимеров после пирогенного повреждения.

Таблица 2

Содержание органического углерода (%) в компонентах фитомассы на пробных площадях Прибайкальского заказника

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

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования

Древесина обладает стабильно более низким содержанием углерода (46–49% в среднем), что соответствует составу лигноцеллюлозного комплекса, где доля углеводов (целлюлоза, гемицеллюлоза) выше. Хвойные породы (особенно сосна, до 49,55%) в среднем превосходят лиственые (береза – 46,09%) по этому показателю, что обусловлено большей долей смол и лигнина. Осина характеризуется наименьшими значениями во всех тканях – вероятно, из-за более рыхлой структуры и повышенной зольности. Листва/хвоя содержит 45–51 % углерода. Фотосинтетические ткани накапливают углеводы, а у хвойных – также терпены и смолы. Относительно более низкие значения по сравнению с древесиной связаны с высоким содержанием воды, пигментов и зольных элементов. Травянистые растения имеют сравнительно низкое содержание углерода: в надземных частях 42,96–47,07%, в корнях 32,64–47,48%. Это объясняется слабой степенью одревеснения, высокой зольностью и, для корней, повышенным содержанием минеральных веществ. Опад демонстрирует вариабельность (41,28–46,91%), отражающую его гетерогенный состав (частично разложившиеся остатки). На гарях содержание углерода в опаде может возрастать за счет включения обугленных фрагментов.

Запасы углерода по компонентам фитомассы

Углеродный бюджет древостоев в исследованных насаждениях Прибайкальского заказника существенно варьирует в зависимости от типа леса, возраста древостоя и интенсивности пирогенного воздействия. Во всех пробных площадях доминирующим компонентом, формирующим 73–75% общего пула углерода, является стволовая древесина, что подтверждает ее ключевую роль в долгосрочной секвестрации углерода.

Общие запасы углерода в древесном ярусе достигают максимума на контролльном участке ПП-3 (48,68 т С/га) и минимума на сильно нарушенном участке ПП-5 (15,39 т С/га). Такое распределение типично для спелых древостоев, где основная биомасса сосредоточена в стволах. Сходные закономерности отмечают [12], указывая, что у светолюбивой сосны, хорошо очищающейся от сучьев, углерод в основном аккумулируется в стволах и корнях, тогда как вклад крон незначителен.

Ветви и хвоя (листва) образуют второстепенные углеродные пулы: их вклад составляет 12–14 и 4–7% соответственно от запаса древесины. Количественные значения этих фракций коррелируют с запа-

сом древесины, что соответствует биологическим закономерностям роста. Доля углерода, связанного в надземной фитомассе, последовательно возрастает от менее продуктивного сосняка вейниково-кипрейного к более продуктивному сосняку рододендрово-брусничному. Такое распределение обусловлено общей динамикой биопродуктивности древостоев в различных экологических условиях под влиянием пожаров. На ненаруженном участке ПП-3 более интенсивные физиологические процессы способствуют формированию более мощного скелетного блока (ствол, ветви) по отношению к фотосинтезирующему аппарату (хвоя). Доля стволовой коры в общем пуле надземной фитомассы имеет тенденцию к снижению от наиболее нарушенных сосновых (veyниково-кипрейного, разнотравно-осокового) к менее затронутому огнем сосновому рододендрово-брусничному.

Следующим по значимости компонентом является лесная подстилка (опад), составляющая 15–24% общего запаса углерода. Наибольшее ее количество зафиксировано на ПП-3 (11,52 т С/га), наименьшее – на ПП-2 (5,45 т С/га), что отражает различную интенсивность процессов накопления и разложения органического вещества. Валеж зарегистрирован только на участке ПП-5, где его запас составил 4,9 т С/га (около 15% общего пула). Его наличие – прямое следствие недавнего массового отмирания деревьев после интенсивного пожара.

Сравнительный анализ пробных площадей показывает, что с улучшением экологических условий и снижением пирогенной нагрузки общие запасы углерода в компонентах надземной фитомассы возрастают. ПП-3 выделяется максимальными общими запасами (76,93 т С/га), что отражает высокую продуктивность, зрелость и ненаруженность лесной экосистемы. ПП-5, подвергшийся сильной пирогенной трансформации, имеет минимальный показатель (32,85 т С/га), что обусловлено низковозрастной структурой сохранившегося древостоя и значительной долей валежа. ПП-2 (лиственнично-сосновый лес) демонстрирует аномально низкий запас подстилки при высокой биомассе древесины, что может свидетельствовать об ускоренной минерализации опада в данных условиях.

Общая структура углеродных пулов на исследованной территории характеризуется выраженным доминированием стволовой древесины (около 60%), значительной долей подстилки (около 17%) и суммарным вкладом надземных частей кроны (кора,

ветви, листва) порядка 20 %. Валеж, присутствующий локально, является важным, хотя и менее массивным компонентом, играющим ключевую экологическую роль в процессах сукцессии и круговорота веществ после нарушений. Значительная доля подстилки подчеркивает важность почвенных процессов и деструкции в функционировании данных лесных экосистем.

Выводы

Проведенное исследование позволило количественно оценить запасы углерода в светлохвойных лесах Прибайкальского заказника, находящихся на разных стадиях постпирогенного восстановления. Сформулированы следующие основные выводы:

1. Содержание углерода в фитомассе варьирует в широком диапазоне (32,6–57,4 %) и зависит от вида растения и типа ткани. Использование усредненного коэффициента (50 %) может приводить к значительной погрешности, что подтверждает необходимость применения региональных уточненных значений.

2. Интенсивность пожара кардинально влияет на величину углеродного пула. Общий запас углерода на гарях с катастрофическими повреждениями (32,9 т С/га) более чем вдвое ниже, чем в ненарушенных спелых сосновках (76,9 т С/га). Основные потери приходятся на стволовую древесину.

3. Структура углеродного бюджета после пожара меняется: снижается доля долгоживущей древесной биомассы и возрастает роль валежа, подстилки и травянистого покрова. Даже через 8–10 лет сильно нарушенные экосистемы не восстанавливают исходный запас углерода.

4. Динамика восстановления определяется не только временем, прошедшим после пожара, но и его интенсивностью, а также исходным типом леса. Это требует дифференцированного подхода к оценке последствий возгораний.

Практическая значимость работы заключается в получении оригинальных данных для повышения точности региональных и национальных кадастров углерода. Результаты подчеркивают ключевую роль сохранения спелых лесов и необходимость учета интенсивности пожара при оценке углеродного

баланса и планировании восстановительных мероприятий в Байкальском регионе.

Список литературы

- Cerny J., Pokorny R., Vejpustkova M., Sramek V., Bednar P. Air Temperature Is the Main Driving Factor of Radiation Use Efficiency and Carbon Storage of Mature Norway Spruce Stands under Global Climate Change // International Journal of Biometeorology. 2020. Vol. 64. Is. 9. P. 1599–1611. DOI: 10.1007/s00484-020-01941-w.
- Clason A.J., Farnell I., Lilles E.B. Carbon 5–60 Years After Fire: Planting Trees Does Not Compensate for Losses in Dead Wood Stores // Frontiers in Forests and Global Change. 2022. Vol. 5–2022. DOI: 10.3389/ffgc.2022.868024.
- Dar J.A., Sundarapandian S. Variation of Biomass and Carbon Pools with Forest Type in Temperate Forests of Kashmir Himalaya, India // Environmental Monitoring and Assessment. 2015. Vol. 187. Is. 2. DOI: 10.1007/s10661-015-4299-7.
- Schepaschenko D., Molchanova E., Fedorov S. et al. Russian forest sequesters substantially more carbon than previously reported // Sci Rep. 2021. Vol. 11. 12825. DOI: 10.1038/s41598-021-92152-9.
- Bousquet E., Mialon A., Rodriguez-Fernandez N. et al. Monitoring post-fire recovery of various vegetation biomes using multi-wavelength satellite remote sensing // Biogeosciences. 2022. T. 19. № 13. P. 3317–3336. DOI: 10.5194/bg-19-3317-2022.
- Di Sacco A., Hardwick K.A., Blakesley D. et al. Ten golden rules for reforestation to optimize carbon sequestration, biodiversity recovery and livelihood benefits // Global Change Biology. 2021. T. 27. № 7. P. 1328–1348. DOI: 10.1111/gcb.15498.
- Powers E.M., Marshall J.D., Zhang J., Wei L. Post-fire management regimes affect carbon sequestration and storage in a Sierra Nevada mixed conifer forest // Forest Ecology and Management. 2013. T. 291. P. 268–277. DOI: 10.1016/j.foreco.2012.07.038.
- Ma S., He F., Tian D. et al. Variations and determinants of carbon content in plants: a global synthesis // Biogeosciences. 2018. T. 15. № 3. P. 693–702. DOI: 10.5194/bg-15-693-2018.
- Наквасина Е.Н., Шумилова Ю.Н. Динамика запасов углерода при формировании лесов на постпирогенных землях // Известия вузов. Лесной журнал. 2021. № 1. С. 46–59. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-1-46-59.
- Khan A., Zhang X., Zhang K., Iqbal A., Ahmad A., Saeed S., Hayat M., Yang X. Tree Distribution Pattern, Growing Stock Characteristics and Biomass Carbon Density of Mongolian Scots pine (*Pinus Sylvestris* var *Mongolica*) Plantation of Horqin Sandy Land, China // Pakistan Journal of Botany. 2020. Vol. 52. Is. 3. P. 995–1002. DOI: 10.30848/PJB2020-3(26).
- Усольцев В.А., Залесов С.В. Методы определения биологической продуктивности насаждений. Екатеринбург: Уральский лесотехнический университет, 2005. 147 с. ISBN 5-94984-049-6.
- Уткин А.И. Биологическая продуктивность лесов (методы изучения и результаты) // Лесоведение и лесоводство. Итоги науки и техники. М.: ВИНИТИ. 1975. С. 9–189.
- Zamolodchikov D.G., Grabovskii V.I., Kraev G.N. A twenty-year retrospective on the forest carbon dynamics in Russia // Contemporary Problems of Ecology. 2011. Vol. 4. Is. 7. P. 706–715. DOI: 10.1134/S1995425511070022.
- Бобкова К.С., Тужилкина В.В. Содержание углерода и калорийность органического вещества в лесных экосистемах Севера // Экология. 2001. № 1. С. 69–74. ISSN 0367-0597.
- Пристова Т.А., Загирова С.В., Манов А.В. Продукция органического вещества и аккумуляция углерода в напочвенном покрове еловых и бересклетовых фитоценозов в предгорьях Приморского Урала // Теоретическая и прикладная экология. 2018. № 2. С. 53–61. DOI: 10.25750/1995-4301-2018-2-053/2-061.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

Финансирование: Исследования выполнены при поддержке гранта РНФ № 24-24-20098 (<https://rsrf.ru/project/24-24-20098/>).

Financing: The research was supported by the Russian Science Foundation grant No. 24-24-20098 (<https://rsrf.ru/project/24-24-20098/>).