

**А.И. Мельник, С.А. Чанчикова, А.А. Вайс, В.Н. Немич,
П.В. Михайлов, Е.Ф. Лузина, А.В. Мантулина**

**УГЛЕРОДНЫЙ ПУЛ ДРЕВЕСНОГО ОПАДА СОСНЯКОВ
ПОДТАЕЖНО-ЛЕСОСТЕПНОГО РАЙОНА СРЕДНЕЙ СИБИРИ
ЗА ВЕГЕТАЦИОННЫЙ ПЕРИОД 2022 ГОДА**

Введение. Опад является важным компонентом возврата питательных веществ от растений к лесной подстилке и минеральной почве. Он обеспечивает поверхность земли растительными остатками (хвоей, листвой, ветками, шишками, корой и т. д.), которые постепенно разлагаются при участии сообществ редуцентов. В ходе этого процесса химические элементы становятся доступными для поглощения растениями, что имеет решающее значение для продуктивности лесных экосистем [Карпачевский, 1981; Jasińska, Sewerniak et al., 2020; Иванова, 2021; Солодовников, 2019].

Показатели массы и структуры опада характеризуются годовой динамикой, связанной с цикличностью физиологических процессов, обычно обусловленной сезонностью (почвенно-климатические условия, погодные условия текущего времени и предыдущих лет, степень воздействия энтомофитовредителей, порода, возраст древостоя и т. д.). Однако на наблюдаемые закономерности могут влиять случайные события, например, экстремальные погодные явления или лесные пожары высокой интенсивности [Jasińska, Sewerniak et al., 2020; Иванова, 2021; Кузнецов, 2010; Baietto, Hernández et al., 2021].

Для всех лесопокрываемых площадей типично поступление опада на протяжении всей фазы роста и развития, но в лесах с паузой в метаболизме приток опада резко увеличивается в начале и конце вегетационного периода [Карпачевский, 1981; Jasińska, Sewerniak et al., 2020; Иванова, 2021; Абрамова, Брянин, 2018].

Процесс разложения опада, часто начинающийся с отдельного дерева, фактически представляет собой начальный этап круговорота. Карпачевский Л.О., в связи с этим, разделяет растительные остатки в зависимости от их способности к разложению на две части: активную и неактивную. К активной части относятся листья (хвоя), почечные чешуи, соцветия, пыльца и семена, а к неактивной – ветви, шишки, кора, лишай-

ники. Данная классификация является самой распространенной на сегодняшний день.

Другие исследователи выделяют иные структурные элементы в зависимости от задач исследования. Так, зарубежными учеными определялись лишь две части: хвоя и смешанная фракция, состоящая из всех остальных собранных компонентов [Иванова, 2021]. При отборе материала с поверхности земли могли идентифицироваться такие фракции, как опад карликовых кустарников, моховой опад, травы [Решетникова, 2011].

Показатели массы опада изучали многие исследователи, в том числе из Польши [Jasińska, Sewerniak et al., 2020; Węgiel, Polowy, 2020]; Уругвая [Baietto, Hernández et al., 2021]; Северо-Западной части РФ [Кузнецов, 2010, 2011; Осипов, 2017; Лянгузова и др., 2020]; левобережной части реки Енисей [Решетникова, 2011] и др.

Одним из свойств растительных организмов является способность поглощать органический углерод в процессе фотосинтеза. В связи с этим актуальны работы по оценке баланса углерода [Замолодчиков и др., 2011; Малышева и др., 2017; Назаренко, Красноярова, 2018; Федоров, 2017]. Однако остается открытым вопрос уточнения данных по количеству депонированного углерода разными компонентами леса (включая подземные, отпад и опад).

Элементом аккумуляирования углерода является процесс разложения опада надземной фитомассы [Абрамова, Брянин, 2018; Кузнецова, 2021]. Основную долю опада в сосновых насаждениях составляет его древесная часть (до 87%) [Стеценко, Сафонов, 2010].

На основании анализа состояния проблемы и необходимости изучения процесса опада на региональном уровне сформулирована цель исследования. Это оценка динамики поступления фитомассы и углеродного пула надземного опада в сосновых насаждениях на территории подтаежно-лесостепного района Средней Сибири.

Методика исследования. Объектом изучения являлся опад модальных насаждений сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.). Исследования проведены на территории учебно-опытного лесхоза СибГУ в Караульном участковом лесничестве, расположенного в пригородной зоне города Красноярска (рис. 1). Территория лесничества относится к Средне-Сибирскому подтаежно-лесостепному району.

Полевые и лабораторные исследования осуществлялись с начала мая по конец октября 2022 года. Временной отрезок с мая по ноябрь характеризуется преимущественно теплой погодой, а также формированием большей части годового опада, в сравнении с зимне-весенним периодом.

Изучение лесных сообществ и их компонентов начинаются с рекогносцировочного обследования территории для получения общих сведений о характере растительного покрова территории [Жукова и др., 2008]. После предварительной оценки насаждений на основе модальности породного состава древостоев и лесорастительных условий, авторами заложены четыре пробные площади (ПП), где впоследствии проводилось исследование древесного опада. В соответствии с этой задачей на каждой ПП осуществлялась равномерная установка стационарных опадоуловителей (ОУ) [Базилевич и др., 1978; Лиханова, 2014; Родин и др., 1967]. В зависимости от размера пробной площади количество ОУ менялось от 8 до 10 штук.

Сбор опада осуществлялся в разные временные интервалы на основании естественных стадий функционирования фитоценозов [Земсков, 2021].

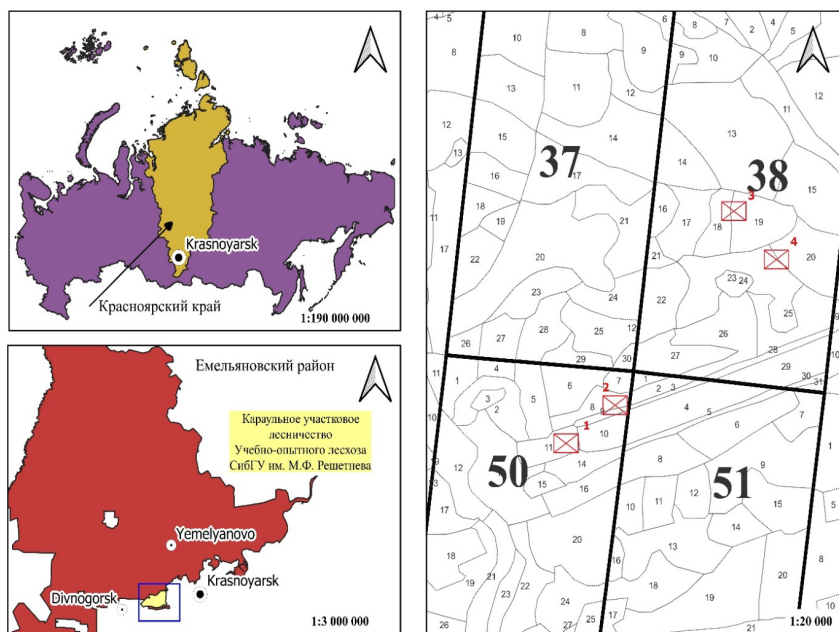


Рис. 1. Схема расположения исследуемых пробных площадок на территории Учебно-опытного лесхоза (1 ПП – квартал 50, выдел 11; 2 ПП – 50/8; 3 ПП – 38/18; 4 ПП – 38/25)

Fig. 1. Diagram defining the location of research test plots on the territory of Educational and Experimental Forestry (1 research plot – 50th forest compartment, 11th forest unit; 2 RP – 50/8; 3 RP – 38/18; 4 RP – 38/25)

Образцы, достигшие воздушно-сухого состояния, делились на группы. Условно выделялись две составляющие опада: неактивная (ветви, шишки) и активная (все остальное). После разбора массы проводилось взвешивание, сушка в специализированном шкафу при температуре 105–110 °С до достижения абсолютно сухого веса, также рассчитывался запас опада на единицу площади (в г/м², кг/га).

После оценки биомассы древесного опада вычислены запасы депонированного углерода с помощью конверсионного коэффициента, предложенного Ф.И. Земсковым – 0,47 [Земсков, 2021].

Статистическая обработка материала выполнялась в специализированном пакете программы «STATISTICA» и пакете анализа данных электронной таблицы «Excel». С помощью статистического анализа получены оценочные статистики при уровне доверительной вероятности 0,954.

Результаты исследования. На всех пробных площадях проведено описание насаждений и определены следующие показатели: относительная полнота, средний возраст, диаметр и высота древостоя, тип леса. Данные глазомерно-измерительной таксации представлены в табл. 1.

Таблица 1

Таксационные показатели сосновых насаждений

Silvicultural and forest inventory of the studied pine stands

ПП	Состав	A _{ср} , лет	D _{ср} , см	H _{ср} , м	Бонитет	Тип леса	P _{отн}	M, м ³ /га
1	9С1Б	95	29,3	25,3	II	С разнотравно-зеленомошный	1,0	412
2	7С3Б	90	27,7	25,0	II	С осочково-разнотравный	0,8	292
3	10С	75	23,0	27,0	I	С разнотравно-зеленомошный	0,5	219
4	10С	97	30,0	29,0	I	С осочково-разнотравный	0,6	252

Примечание: A_{ср} – средний возраст, D_{ср} – средний диаметр, H_{ср} – средняя высота, P_{отн} – относительная полнота, M – стволловой запас, С – сосняк.

Пробные площади отражали модальные условия по составу, полноте, бонитету, возрасту и типу леса для исходной территории. Состав преимущественно чистые древостои с небольшой долей берёзы до 3 единиц. Высота насаждений варьировала от 25 до 29 м. Группа возраста – приспевающие и спелые сосняки (75–97 лет). Класс бонитета I–II, что указывает на

благоприятные условия местопроизрастания. Полнота менялась от 0,5 до 1,0. Типологическая структура соответствует наиболее представленным типам леса исследуемой территории: сосняки осочково-разнотравного и разнотравно-зеленомошного типов леса.

Результаты выполненного деления опада на фракции и их составляющие компоненты представлены в табл. 2.

Таблица 2

Абсолютно сухая масса (числитель) – г/м² и доля участия компонентов фракций (знаменатель) в опаде сосновых насаждений – %

Absolutely dry mass (numerator) – g · m⁻² and the share of fraction components (denominator) in the litter of pine stands – %

Компоненты фракции	Пробная площадь			
	1	2	3	4
Листья лиственных пород	<u>1,2±0,25</u> 0,4	<u>17,3±4,12</u> 6,2	<u>17,5±4,01</u> 6,4	<u>8,4±2,58</u> 4,2
Хвоя сосны	<u>185,7±36,09</u> 54,4	<u>112,8±20,00</u> 40,3	<u>165,8±36,20</u> 61,1	<u>115,5±23,97</u> 57,2
Трава	<u>0,9±0,17</u> 0,3	<u>2,3±0,32</u> 0,8	<u>2,8±0,45</u> 1,0	<u>2,4±0,45</u> 1,2
Семена сосны	<u>0,7±0,14</u> 0,2	<u>0,7±0,15</u> 0,2	<u>0,2±0,04</u> 0,1	<u>0,1±0,03</u> 0,1
Кора древесных пород	<u>34,3±3,98</u> 10,0	<u>19,6±2,58</u> 7,0	<u>27,3±3,59</u> 10,0	<u>20,9±2,40</u> 10,3
Прочее (неидентифиц. остатки)	<u>28,5±4,35</u> 8,3	<u>35,5±4,70</u> 12,7	<u>20,0±2,68</u> 7,4	<u>23,3±3,37</u> 11,6
Итого по актив. фракции	<u>251,3±37,51</u> 73,6	<u>188,2±23,07</u> 67,2	<u>233,6±42,48</u> 86,0	<u>170,6±24,45</u> 84,6
Ветви	<u>61,7±16,90</u> 18,1	<u>30,9±5,42</u> 11,0	<u>23,3±4,95</u> 8,6	<u>11,1±2,63</u> 5,5
Шишки	<u>28,3±2,56</u> 8,3	<u>60,9±7,78</u> 21,8	<u>14,6±2,18</u> 5,4	<u>20,0±3,30</u> 9,9
Итого по неактив. фракции	<u>90,0±17,84</u> 26,4	<u>91,8±9,19</u> 32,8	<u>37,9±6,42</u> 14,0	<u>31,1±2,96</u> 15,4
Общий опад	<u>341,3±54,90</u> 100,0	<u>280,0±24,95</u> 100,0	<u>271,5±44,00</u> 100,0	<u>201,7±24,59</u> 100,0

Примечание: Статистики получены при уровне доверительной вероятности 0,954.

Средняя масса опада в период с мая по ноябрь составила $273,6 \pm 57,12$ г/м² или $2,7 \pm 0,57$ т/га. Максимальное значение зафиксировано на 1 ПП – $341,3 \pm 54,90$ г/м², меньшее на 4 ПП – $201,7 \pm 24,59$ г/м². В среднем доля участия активной фракции опада – 77,9% ($210,9 \pm 37,74$ г/м²), неактивной – 22,1% ($62,72 \pm 32,72$ г/м²). Масса шишек и ветвей характеризовалась сильной вариабельностью (5,4–21,8%). В общей массе опада на всех пробных площадях выявлено преобладание хвои сосны (от 40 до 61%). Масса листьев минимальна, что связано с преимущественно чистым породным составом (однако на территории 3 и 4 ПП присутствуют подлесочные растения, что отразилось на результатах). Оценивать опад трав в задачи не входило, поэтому учитывалась фитомасса только polegших растений непосредственно в зоне сетки опадоуловителей. По семенам процент участия минимален, что обусловлено зоогенным фактором и малым весом. Содержание неидентифицированных остатков достаточно велико от 7 до 10%, разница на участках 1, 3 и 2, 4 ПП и объясняется типом леса.

Количественные оценки получены путем усреднения данных (среднее арифметическое), также рассчитаны стандартные отклонения, все показатели получены при уровне доверительной вероятности 0,954.

Одним из этапов исследования являлась оценка доли участия опада в составе лесной подстилки. Для этого собрана информация по морфологическим показателям верхнего почвенного горизонта. Работа проводилась в начале вегетации, непосредственно на стыке двух периодов годичной динамики поступления и разложения опада [Цыкунов, 1974]. Имея данные о массе подстилки, которая проходит стадию разложения, и сведения о поступлении фитомассы древесного опада за весь вегетационный сезон, получены данные о цикличности процесса круговорота питательных веществ на территории исследования (табл. 3).

Таблица 3

Соотношение фитомассы древесного опада и лесной подстилки

Ratio of phytomass of falling litter and forest litter

ПП	Масса подстилки до начала вегетации, т/га	Масса опада в вегетацию, т/га	Доля опада от массы подстилки, %
1	50,40	3,41	6,8
2	30,63	2,80	9,1
3	45,98	2,71	5,9
4	27,48	2,02	7,4

Примечание: Масса подстилки и опада в абсолютно сухом состоянии.

Масса древесного опада менялась в пределах от 2,02 до 3,41 т/га. Максимальное значение на 1 ПП (3,41 т/га), что можно связать с полнотой и стволовым запасом. Доля опада от массы лесной подстилки варьировала от 5 до 9%. С точки зрения процесса разложения подстилки (который длится по данным разных исследователей от 3 до 8 лет [Цыкунов, 1974]) установлено, что в разных типах леса сохраняется индивидуальная скорость разложения. Количество массы древесного опада отражает таксационные показатели, почвенные и атмосферно-климатические условия.

На следующем этапе выполнили оценку депонированного углерода в поступающем опаде:

- 1 ПП – $1,6 \pm 0,26$ т/га;
- 2 ПП – $1,3 \pm 0,12$ т/га;
- 3 ПП – $1,3 \pm 0,21$ т/га;
- 4 ПП – $1,0 \pm 0,12$ т/га.

Результаты исследования приведены за вегетационный период без учета накопления в холодное время года (+20–30%). Это нужно принимать во внимание при сравнении с годовыми данными других авторов (сосняки Польши: 1,51–1,70 С т/га [Jasińska, Sewerniak et al., 2020], 0,71–0,86 С т/га [Węgiel, Polowy, 2020]; сосняки Республики Коми: 1,3 С т/га [Кузнецов, 2010]; сосняки левобережной части р. Енисей: 2,45 С т/га [Решетникова, 2011]). Различия в углеродных пулах объясняются условиями местопроизрастания; почвенными, типологическими и таксационными особенностями сосновых насаждений.

Для исходного периода наблюдений (вегетационный период 2022 года) выполнен анализ временной динамики накопления углерода в составе опада. Незначительная аккумуляция массы листьев выявлена в первые дни на 4 ПП, что очевидно связано с близким расположением березовых древостоев. Также за этот период отмечен порывистый ветер с максимальными значениями до 15 м/с, что могло повлиять на количество поступающего опада в целом. В дальнейшем, наблюдалась стагнация в накоплении. После 13 августа (сотый день исследования) выявлено достаточно активное поступление углерода, что связано с началом «увядания» лиственных древостоев и подлесочных пород, произрастающих в соседних выделах.

Аккумуляция углерода в опаде трав совсем незначительно и связано главным образом с типом леса и степенью вытаптывания растительности.

Количество углерода в семенах минимально, вследствие малого веса и эндозоохории. Отмечена существенная разница между значениями 1, 2 и 3,

4 ПП, что объясняется полнотой древостоев. Также два первых участка характеризуются интенсивной рекреационной нагрузкой, что влияет на обитание животных.

Количество углерода в опаде коры незначительно и накапливается без резких скачков.

Депонирование углерода в опаде неидентифицированных остатков, идентичен процессу аккумуляирования элемента в семенах. Наблюдался высокий рост на начальном этапе вегетационного периода, затем интенсивность снижалась. Схожесть объясняется наличием в компоненте продуктов генеративного размножения, а именно микростробилов. Со второй половины мая до середины июня наступает период цветения сосны обыкновенной (*P. sylvestris* L.).

Поступление хвойного опада (рис. 2) стабильно увеличивается в течение вегетационного периода. На первой неделе наблюдений выявлен небольшой скачок на 1 и 2 ПП, что связано с порывами ветра. В первой половине наблюдения отмечена низкая интенсивность депонирования элемента, что объясняется естественными процессами в вегетационном цикле. В дальнейшем процесс накопления углерода происходит более интенсивно.

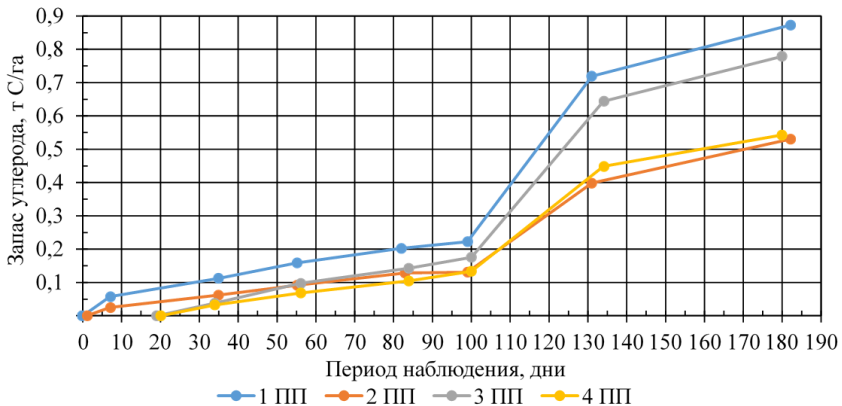


Рис. 2. Процесс накопления углерода опада хвои по дням наблюдения

Fig. 2. The process of carbon accumulation in needle litter by days of observation

На процесс накапливания опада влияют два таксационных показателя: запас и возраст. На 1 ПП стволовой запас равен 412 м³/га – 95 лет, а на 3 ПП 219 м³/га – 75 лет. Чем старше древостой, тем интенсивнее процесс

опада хвой. Однако учитывая большую разницу в запасах древесины, можно предположить, что сочетание этих факторов привели к полученным результатам. Близкая ситуация отмечена на 2 и 4 ПП (рис. 2), однако небольшое различие в запасах (292 и $252 \text{ м}^3/\text{га}$ соответственно) и возрасте (на 2 ПП более молодой древостой) подтверждают вывод относительно интенсивности опада сосновых древостоев.

В табл. 4 представлены данные по стадиям поступления углерода в опад хвой. Определены три стадии (умеренная, значительная, интенсивная), которые можно выделить в зависимости от накопления углерода.

Таблица 4

Стадии, длительность периода и накопление массы углерода в опаде хвой
Stages, duration of the period and accumulation of carbon mass in the needle litter

ПП	Стадия роста	Длительность стадии, дней	Даты	Накопление, т С/га
1	умеренная	100	05.05.2022–13.08.2022	$0,0–222,3 \cdot 10^{-3}$
	интенсивная	31	14.08.2022–13.09.2022	$222,3 \cdot 10^{-3}–719,5 \cdot 10^{-3}$
	умеренная	51	14.09.2022–03.11.2022	$719,5 \cdot 10^{-3}–872,6 \cdot 10^{-3}$
2	умеренная	100	05.05.2022–13.08.2022	$0,0–130,9 \cdot 10^{-3}$
	значительная	31	14.08.2022–13.09.2022	$130,9 \cdot 10^{-3}–398,4 \cdot 10^{-3}$
	умеренная	51	14.09.2022–03.11.2022	$398,4 \cdot 10^{-3}–530,2 \cdot 10^{-3}$
3	умеренная	81	24.05.2022–13.08.2022	$0,0–175,6 \cdot 10^{-3}$
	интенсивная	34	14.08.2022–16.09.2022	$175,6 \cdot 10^{-3}–644,3 \cdot 10^{-3}$
	умеренная	46	17.09.2022–01.11.2022	$644,3 \cdot 10^{-3}–779,2 \cdot 10^{-3}$
4	умеренная	80	25.05.2022–13.08.2022	$0,0–133,8 \cdot 10^{-3}$
	значительная	34	14.08.2022–16.09.2022	$133,8 \cdot 10^{-3}–448,7 \cdot 10^{-3}$
	умеренная	46	17.09.2022–01.11.2022	$448,7 \cdot 10^{-3}–542,8 \cdot 10^{-3}$

Неактивная фракция обладает высокой вариабельностью из-за большого веса. В связи с этим процесс выявления закономерностей затруднен. Выделено резкое накопление в начале исследования, которое связано с порывами ветра, в остальной период активность процесса довольно низкая и достаточно равномерная.

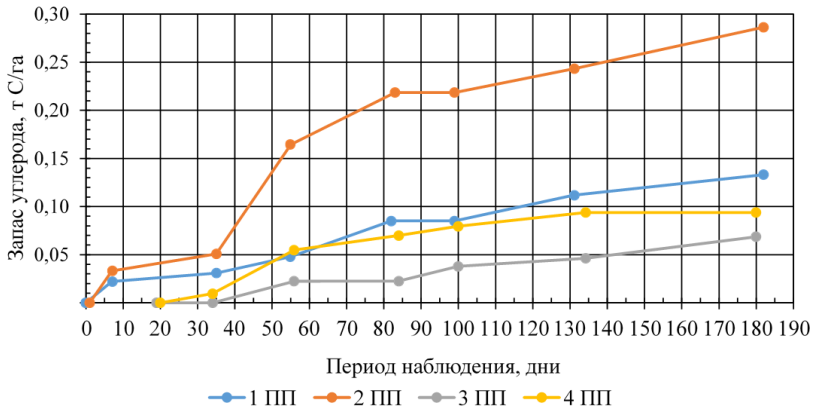


Рис. 3. Процесс накопления углерода опада шишек по дням наблюдения
 Fig. 3. The process of carbon accumulation in cone litter by days of observation

Интенсивность процесса аккумуляции углерода в опаде шишек (рис. 3) происходит равномерно на всех участках, за исключением 2 ПП. Стадии депонирования углерода представлены в табл. 5 (стабильно низкая, умеренная, интенсивная). Максимальные значения отмечены на 2 ПП, а минимальные на 3 ПП.

Таблица 5

Стадии, длительность периода и накопление массы углерода в опаде шишек
Stages, duration of the period and accumulation of carbon mass in the litter of cones

ПП	Стадия роста	Длительность стадии, дней	Даты	Накопление, т С/га
1	стабильно низкая	182	05.05.2022 – 03.11.2022	$0,0 - 1331,8 \cdot 10^{-4}$
2	стабильно низкая	36	05.05.2022 – 09.06.2022	$0,0 - 507,8 \cdot 10^{-4}$
	интенсивная	20	10.06.2022 – 29.06.2022	$507,8 \cdot 10^{-4} - 1645,1 \cdot 10^{-4}$
	умеренная	126	30.06.2022 – 03.11.2022	$1645,1 \cdot 10^{-4} - 2863,7 \cdot 10^{-4}$
3	стабильно низкая	160	24.05.2022 – 01.11.2022	$0,0 - 686,2 \cdot 10^{-4}$
4	стабильно низкая	161	25.05.2022 – 01.11.2022	$0,0 - 938,9 \cdot 10^{-4}$

Выводы. В результате изучения процесса динамики углеродного пула опада в наиболее активный период развития (май–ноябрь) сосновых насаждений подтаёжно-лесостепного района Средней Сибири получены следующие выводы:

- по данным учёных основным источником поступления органических веществ в почву является опад, от которого зависят процессы формирования и накопления углерода;
- доля опада от массы лесной подстилки варьировала от 5 до 10%. Установлено, что характер поступления опада зависит от таксационных показателей;
- результаты оценки депонированного углерода в опаде приведены за вегетационный период без учета накопления в холодное время года. В зависимости от условий местопроизрастания итоговые значения исследователей различаются;
- в среднем доля участия активной фракции опада составила 77,9%, неактивной – 22,1%;
- в общей массе опада на всех пробных площадях выявлено преобладание хвои сосны (от 40 до 61%). Доля участия листьев, травы и семян минимальна, что обусловлено: составом древостоя, конструкцией опадоуловителей, интенсивной рекреационной нагрузкой, зоогенным воздействием и малым весом семян;
- масса неидентифицированных остатков достаточно велика от 7 до 10%. Разница на участках 1, 3 ПП и 2, 4 связана вероятнее всего с типом леса;
- масса депонированного углерода опада варьировала на пробных площадях от $1,0 \pm 0,12$ т С/га до $1,6 \pm 0,26$ т С/га;
- результаты анализа временного накопления показали, что в начале исследования скорость поступления опада высока и связана с метеорологическими показателями. В дальнейшем, наблюдается снижение интенсивности процесса. После 13 августа выявлено достаточно активное поступление углерода в связи с подготовкой к переходу изучаемых экосистем к стадии покоя, что объясняется естественными процессами в вегетационном цикле;
- динамике процесса аккумуляции углерода в опаде сосновых насаждений свойственно стадийное (неравномерное) накопление по отдельным составляющим (фракциям) и длительности процесса. Выделены следующие стадии по всем фракциям: стабильно низкая, умеренная, значительная, интенсивная;
- во временной динамике накапливания углерода в составляющей хвои выделены три стадии (умеренная, значительная, интенсивная), что являет-

ся показательным для активной фракции, так как доля участия в большинстве случаев свыше 50%;

– динамика аккумуляции углерода в составляющей шишек является показательной для неактивной фракции, на период исследования активность процесса довольно низкая и достаточно равномерная;

– в пределах пробных площадей установлена различная интенсивность накопления углерода, с учетом длительности периода и по количеству опада в конкретной стадии.

Необходимо отметить, что опад как часть лесной экосистемы характеризуется высокой вариабельностью и зависит от совокупности как биотических, так и абиотических факторов.

Исследование проводилось в рамках государственного задания, установленного Министерством науки и высшего образования Российской Федерации, для реализации проекта «Динамика восстановления таежных лесов Центральной Сибири, нарушенных энтомовредителями» (№ FEFE–2024–0029) коллективом научной лаборатории «Лесных экосистем».

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Абрамова Е.Р., Брянин С.В. Разложение опада в постпирогенных лиственничниках хребта Тукурингра (верхнее Приамурье) // Сибирский лесной журнал. 2018. № 2. С. 71–77.

Жукова А.И., Григорьев И.В., Григорьева О.И., Ледяева А.С. Лесное ресурсосведение: учеб. пособие. СПб.: СПб ГЛТА, 2008. 205 с.

Замолотчиков Д.Г., Грабовский В.И., Краев Г.Н. Динамика бюджета углерода лесов России за два последних десятилетия // Лесоведение. 2011. № 6. С. 16–28.

Земсков Ф.И. Детритогенез в условиях лесных биогеоценозов урбанизированных территорий: дисс. ... канд. биол. наук: 03.02.13 – почвоведение М.: МГУ, 2021. 219 с.

Иванова Е.А. Формирование и разложение древесного опада в лесных экосистемах в фоновых условиях и при аэротехногенном загрязнении // Вопросы лесной науки. 2021. № 4 (3). С. 1–52.

Карпачевский Л.О. Лес и лесные почвы. М.: Лесн. пром-сть, 1981. 264 с.

Кузнецов М.А. Влияние условий разложения и состава опада на характеристики и запас подстилки в среднетаежном чернично-сфагновом ельнике // Лесоведение. 2010. № 6. С. 54–60.

Кузнецов М.А., Осипов А.Ф. Растительный опад как компонент биологического круговорота углерода в заболоченных хвойных сообществах средней тайги // Вестник института биологии Коми научного центра Уральского отделения РАН. 2011. № 9. С. 10–12.

Кузнецова А.И. Влияние растительности на запасы почвенного углерода в лесах (обзор) // Вопросы лесной науки. 2021. Т. 4. № 4. С. 41–95.

Лиханова Н.В. Роль растительного опада в формировании лесной подстилки на вырубках ельников средней тайги // ИВУЗ. Лесной журнал. 2014. № 3. С. 52–66.

Лянгузова И.В. и др. Пространственное распределение запасов напочвенного покрова и лесной подстилки в фоновых и дефолирующих сосновых лесах Кольского полуострова // Растительные ресурсы. 2020. Т. 56. № 4. С. 335–350.

Малышева Н.В., Моисеев Б.Н., Филипчук А.Н. Методы оценки баланса углерода в лесных экосистемах и возможности их использования для расчетов годичного депонирования углерода // Вестник МГУЛ. 2017. № 1. С. 4–13.

Базилевич Н.И. и др. Методы изучения биологического круговорота в различных природных зонах. М.: Мысль, 1978. 185 с.

Назаренко А.Е., Красноярова Б.А. Стоимостная оценка экосистемных услуг по депонированию углерода экосистемами Алтайского края как составляющая перехода к устойчивому развитию // Геополитика и экогеодинамика регионов. 2018. Т. 4 (14) № 3. С. 89–99.

Осинов А.Ф. Запасы и потоки органического углерода в экосистеме спелого сосняка черничного средней тайги // Сибирский лесной журнал. 2017. №. 2. С. 70–80.

Решетникова Т.В. Лесные подстилки как депо биогенных элементов // Вестник КрасГАУ. 2011. № 12. С. 75–82.

Родин Л.Е., Ремезов Н.П., Базилевич Н.И. Методические указания к изучению динамики и биологического круговорота в фитоценозах. Л.: Наука, 1967. 145 с.

Солодовников А.Н. Особенности начального разложения хвои в сосняке брусничном в среднетаежной подзоне Карелии // Труды КарНЦ РАН. 2019. № 11. С. 97–106.

Стеценко А.В., Сафонов Г.В. Инвестиции в леса России: методологические основы. М.: МАКС Пресс, 2010. 134 с.

Федоров Б.Г. Российский углеродный баланс: монография. М.: Общество с ограниченной ответственностью «Научный консультант», 2017. 82 с.

Цыкунов И.А. Накопление лесной подстилки в сосновых насаждениях // Лесоведение и лесное хозяйство: республиканский межведомственный сборник. 1974. № 8. С. 52–55.

Baietto A., Hernández J., del Pino A. Comparative Dynamics of Above-Ground Litter Production and Decomposition from *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden and *Pinus taeda* L., and Their Contribution to Soil Organic Carbon // Forests. 2021. Vol. 12, no. 3. P. 349.

Jasińska J., Sewerniak P., Puchalka R. Litterfall in a Scots Pine Forest on Inland Dunes in Central Europe: Mass, Seasonal Dynamics and Chemistry // Forests. 2020. Vol. 11, no. 6. P. 678.

Węgiel A., Polowy K. Aboveground Carbon Content and Storage in Mature Scots Pine Stands of Different Densities // Forests. 2020. Vol. 11, no. 2. P. 240.

References

Abramova E.R., Brianin S.V. Decomposition of sediment in post-pyrogenic larch forests of the Tukuringra Range (Upper Priamurye). *Siberian Forest Journal*, 2018, no. 2, pp. 71–77. (In Russ.)

Bazilevich N.I. et al. Methods for studying the biological cycle in different natural areas. M.: Mysl, 1978. 185 p. (In Russ.)

Baietto A., Hernández J., del Pino A. Comparative Dynamics of Above-Ground Litter Production and Decomposition from *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden and *Pinus taeda* L., and Their Contribution to Soil Organic Carbon. *Forests*, 2021, vol. 12, no. 3, pp. 349.

Fedorov B.G. The Russian carbon balance: a monograph. M.: Scientific Adviser Limited Liability Company, 2017. 82 p. (In Russ.)

Ivanova E.A. Formation and decomposition of woody debris in forest ecosystems under background conditions and under aerotechnogenic pollution. *Voprosy lesnoy nauki*, 2021, no. 4 (3), pp. 1–52. (In Russ.)

Jasińska J., Sewerniak P., Puchalka R. Litterfall in a Scots Pine Forest on Inland Dunes in Central Europe: Mass, Seasonal Dynamics and Chemistry/ *Forests*. 2020. vol. 11, no. 6. p. 678.

Karpachevskii L.O. Forest and forest soils. M.: Forest Industry, 1981. 264 p. (In Russ.)

Kuznetsov M.A. Effect of decomposition conditions and composition of litter on litter characteristics and stock in a mid-mediterranean bilberry-sphagnum spruce forest. *Forest Science*, 2010, no. 6, pp. 54–60. (In Russ.)

Kuznetsov M.A., Osipov A.F. The vegetation litter as a component of the biological carbon cycle in waterlogged coniferous communities of the Middle Taiga. *Bulletin of the Institute of Biology of the Komi Scientific Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences*, 2011, no. 9, pp. 10–12. (In Russ.)

Kuznetsova A.I. Influence of vegetation on soil carbon stocks in forests. *Voprosy lesnoy nauki*, 2021, vol. 4, no. 4, pp. 41–95. (In Russ.)

Lianguzova I.V. et al. Spatial distribution of ground cover and forest litter stocks in background and defoliation pine forests of the Kola Peninsula. *Plant resources*, 2020, vol. 56, no. 4, pp. 335–350. (In Russ.)

Likhanova N.V. The role of plant debris in the formation of forest litter in logged areas of middle taiga spruce forests. *IVUZ. Journal of Forestry*, 2014, no. 3, pp. 52–66. (In Russ.)

Malysheva N.V., Moiseev B.N., Filipchuk A.N. Methods for estimating the carbon balance in forest ecosystems and how they can be used to calculate annual carbon deposition. *MSUL Bulletin*, 2017, no. 1, pp. 4–13. (In Russ.)

Nazarenko A.E., Krasnoiarova B. A. Cost estimation of ecosystem services of carbon sequestration by ecosystems of Altai Krai as a component of transition to

sustainable development. *Geopolitics and eco-geodynamics of regions*, 2018, vol. 4 (14), no. 3, pp. 89–99. (In Russ.)

Osipov A.F. Organic carbon stocks and fluxes in a mature bilberry pine forest ecosystem of the Middle Taiga. *Siberian Forest Journal*, 2017, no. 2, pp. 70–80. (In Russ.)

Reshetnikova T.V. Forest litter as a depot of biogenic elements. *Krasnoyarsk State Agrarian University Bulletin*, 2011, no. 12, pp. 75–82. (In Russ.)

Rodin L.E., Remezov N.P., Bazilevich N.I. Methodological guidelines for the study of dynamics and biological cycling in phytocenoses. L.: Nauka, 1967. 145 p. (In Russ.)

Solodovnikov A.N. Peculiarities of initial decomposition of pine needles in lingonberry pine forests in the middle taiga subzone of Karelia. *Proceedings of the Karelian Research Center of the Russian Academy of Sciences*, 2019, no. 11, pp. 97–106. (In Russ.)

Stetsenko A.V., Safonov G.V. Investment in Russia's Forests: Methodological Foundations. M.: MAKS Press, 2010. 134 p. (In Russ.)

Tsykunov I.A. Accumulation of forest litter in pine stands. *Forest Science and Forestry: A Republican Interdepartmental Collection*, 1974, no. 8, pp. 52–55. (In Russ.)

Węgiel A., Polowy K. Aboveground Carbon Content and Storage in Mature Scots Pine Stands of Different Densities. *Forests*, 2020, vol. 11, no. 2, p. 240.

Zamolodchikov D.G., Grabovskii V.I., Kraev G.N. Dynamics of the Russian forest carbon budget over the last two decades. *Forest Science*, 2011, no. 6, pp. 16–28. (In Russ.)

Zemskov F.I. Detritogenesis in forest biogeocenoses of urbanized areas: Ph. 219 p. (In Russ.)

Zhukova A.I., Grigorev I.V., Grigoreva O.I., Lediaeva A.S. Forest Resource Science: Training Manual. SPb.: SPb GLTA, 2008. 205 p. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 20.03.2023

Мельник А.И., Чанчикова С.А., Вайс А.А., Немич В.Н., Михайлов П.В., Лузина Е.Ф., Мантулина А.В. Углеродный пул древесного опада сосняков подтаежно-лесостепного района Средней Сибири за вегетационный период 2022 года // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2024. Вып. 250. С. 144–162. DOI: 10.21266/2079-4304.2024.250.144-162

В связи с ростом актуальности работ по оценке бюджета углерода лесопокрываемых территорий, на сегодняшний день остается одна из главных проблем – это уточнение данных по запасам депонированного углерода разными компонентами леса. Целью исследования является оценка динамики поступления фитомассы и углеродного пула наземного опада в сосновых насаждениях на территории подтаежно-лесостепного района Средней Сибири. На территории

учебно-опытного лесхоза Сибирского университета науки и технологий (СибГУ), расположенного в пригородной зоне города Красноярска, заложены пробные площади на основе модальности породного состава древостоев и лесорастительных условий. Проведено таксационное описание изучаемых насаждений, а также сбор морфологической информации, касательно поступающего опада за вегетационный период 2022 года. Выполнены анализ и обработка полученных данных во время полевого и камерального периодов, таких как: абсолютно сухая масса каждой составляющей фракций опада, запасы опада и углерода на единицу площади, доля опада от массы лесной подстилки и стадии роста аккумуляирования древесного опада. Результаты исследования показали, что доля участия активной фракции составила 77,9%, неактивной – 22,1%; преобладание в общей массе выявлено у хвои сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) – до 61%; масса депонированного углерода опада варьировала на пробных площадях от $1,0 \pm 0,12$ т С/га до $1,6 \pm 0,26$ т С/га. Также отмечено неравномерное накопление по составляющим и длительности процесса. Полученные результаты будут использоваться для уточнения данных при оценке углерододепонирующей функции лесов, на территории подтаежно-лесостепного района Средней Сибири.

Ключевые слова: поступление углерода в опад, сосновый древостой, таксационная характеристика, лесная подстилка, временная динамика, фитомасса.

Melnik A.I., Chanchikova S.A., Vais A.A., Nemich V.N., Mikhaylov P.V., Luzina E.F., Mantulina A.V. Carbon pool of tree litter of pine forests in the subtaiga-forest-steppe region of Central Siberia for the growing season of 2022. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehnicheskoy Akademii*, 2024, iss. 250, pp. 144–162 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2024.250.144-162

Due to the increasing relevance of work on the assessment of the carbon budget of forest-covered territories, today one of the main problems is the clarification of data on the reserves of deposited carbon by different forest components. The aim of the study is to assess the dynamics of phytomass input and carbon pool of above-ground litter in pine stands on the territory of the subtaiga-forest-steppe region of Central Siberia. Trial areas based on the modality of the stand species composition and forest growing conditions have been laid on the territory of the educational and experimental forestry belonging to Reshetnev Siberian State University of Science and Technology (SibGU), which is located in the suburban area of Krasnoyarsk city. The taxational description of the studied plantings was carried out, as well as collecting morphological information regarding the incoming tree litter for the growing season of 2022. The analysis and processing of the data obtained during the field and cameral periods were made, such as: the absolutely dry mass of each component of the litter fractions, the stocks of litter and carbon per area unit, the tree litter proportion from the mass of the forest litter and the growth stage of the tree litter accumulation. The results of the study showed that the share of the active fraction was 77.9%, while the inactive fraction was 22.1%; the

predominance in the total mass was revealed in the needles of the common pine (*Pinus sylvestris* L.) up to 61%; the mass of deposited carbon of the litter varied on the sample areas from $1.0 \pm 0.12 \text{ t C ha}^{-1}$ to $1.6 \pm 0.26 \text{ t C ha}^{-1}$. Uneven accumulation in terms of components and duration of the process was also noted. The results obtained will be used to refine the data when assessing the carbon-depositing function of forests on the territory of the subtaiga-forest-steppe region of Central Siberia.

Keywords: carbon input into the tree litter fall, pine forest, taxation characteristics, forest litter, time dynamics, phytomass.

МЕЛЬНИК Александра Игоревна – младший научный сотрудник лаборатории «Лесных экосистем», аспирант кафедры лесоводства, охраны и защиты леса. ORCID 0000-0002-1673-1639, Web of Science Researcher ID ABF-0738-2022, Scopus Author ID 57486433000, ID РИНЦ 1135987.

660037, Проспект имени газеты Красноярский рабочий, д. 31, г. Красноярск, Красноярский край, Россия. E-mail: aleksandrana2013@gmail.com

MELNIK Alexandra I. – PhD student of the Department of Forestry, Protection and Development of Forests, Junior researcher in the Laboratory for Forest Ecosystems. ORCID 0000-0002-1673-1639, Web of Science Researcher ID ABF-0738-2022, Scopus Author ID 57486433000, ID РИНЦ 1135987.

660037. Prospekt imeni gazety Krasnoarskii rabochii 31. Krasnoyarsk. Krasnoyarsk Territory. Russia. E-mail: aleksandrana2013@gmail.com

ЧАНЧИКОВА Светлана Анатольевна – младший научный сотрудник лаборатории «Лесных экосистем». ORCID 0000-0001-6283-1406, Web of Science Researcher ID ABS-0745-2022, Scopus Author ID 57485606100, ID РИНЦ 1114547.

660037, Проспект имени газеты Красноярский рабочий, д. 31, г. Красноярск, Красноярский край, Россия. E-mail: svetylei4ka@mail.ru

CHANCHIKOVA Svetlana A. – Junior researcher in the Laboratory for Forest Ecosystems. ORCID 0000-0001-6283-1406, Web of Science Researcher ID ABS-0745-2022, Scopus Author ID 57485606100, ID РИНЦ 1114547.

660037. Prospekt imeni gazety Krasnoarskii rabochii 31. Krasnoyarsk. Krasnoyarsk Territory. Russia. E-mail: svetylei4ka@mail.ru

ВАЙС Андрей Андреевич – профессор кафедры лесной таксации, лесоустройства и геодезии Сибирского государственного университета науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева, ведущий научный сотрудник лаборатории «Лесных экосистем», доктор сельскохозяйственных наук. ORCID 0000-0003-4965-3670, Scopus Author ID 57211205270, ID РИНЦ 284439.

660037, Проспект имени газеты Красноярский рабочий, д. 31, г. Красноярск, Красноярский край, Россия. E-mail: vais6365@mail.ru

VAIS Andrei A. – DSc (Agricultural), Professor at the Department of Forest Inventory, Forestry regulation and Geodesy, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Leading researcher at the Laboratory Forest Ecosystems. ORCID 0000-0003-4965-3670, Scopus Author ID 57211205270, ID РИНЦ 284439.

660037. Prospekt imeni gazety Krasnoarskii rabochii 31. Krasnoyarsk. Krasnoyarsk Territory. Russia. E-mail: vais6365@mail.ru

НЕМИЧ Виктор Николаевич – доцент кафедры лесной таксации, лесоустройства и геодезии Сибирского государственного университета науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева, старший научный сотрудник лаборатории «Лесных экосистем», кандидат сельскохозяйственных наук. ORCID 0000-0001-8700-532X, Scopus Author ID 57216963386, ID РИНЦ 88238.

660037, Проспект имени газеты Красноярский рабочий, д. 31, г. Красноярск, Красноярский край, Россия. E-mail: nvn-16@yandex.ru

NEMICH Victor N. – PhD (Agricultural), Assistant Professor at the Department of Forest Inventory, Forestry regulation and Geodesy, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Senior Researcher at the Laboratory Forest Ecosystems. ORCID 0000-0001-8700-532X, Scopus Author ID 57216963386, ID РИНЦ 88238.

660037. Prospekt imeni gazety Krasnoarskii rabochii 31. Krasnoyarsk. Krasnoyarsk Territory. Russia. E-mail: nvn-16@yandex.ru

МИХАЙЛОВ Павел Владимирович – заведующий кафедры лесоводства, охраны и защиты леса Сибирского государственного университета науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева, ведущий научный сотрудник лаборатории «Лесных экосистем», кандидат сельскохозяйственных наук. ORCID 0000-0003-3967-0709, Scopus Author ID 57219098463, ID РИНЦ 715203.

660037, Проспект имени газеты Красноярский рабочий, д. 31, г. Красноярск, Красноярский край, Россия. E-mail: mihaylov.p.v@mail.ru

MIKHAYLOV Pavel V. – PhD (Agricultural), Head of the Department of Forestry, Protection and Development of Forests, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Leading researcher at the Laboratory Forest Ecosystems. ORCID 0000-0003-3967-0709, Scopus Author ID 57219098463, ID РИНЦ 715203.

660037. Prospekt imeni gazety Krasnoarskii rabochii 31. Krasnoyarsk. Krasnoyarsk Territory. Russia. E-mail: mihaylov.p.v@mail.ru

ЛУЗИНА Елизавета Фёдоровна – младший научный сотрудник лаборатории «Лесных экосистем». ORCID 0000-0002-4707-1194, Scopus Author ID 57486227000, ID РИНЦ 1135789.

660037, Проспект имени газеты Красноярский рабочий, д. 31, г. Красноярск, Красноярский край, Россия. E-mail: luzinaliza99@mail.ru

LUZINA Elizaveta F. – Junior researcher in the Laboratory for Forest Ecosystems. ORCID 0000-0002-4707-1194, Scopus Author ID 57486227000, ID РИНЦ 1135789.

660037. Prospekt imeni gazety Krasnoiarskii rabochii 31. Krasnoyarsk. Krasnoyarsk Territory. Russia. E-mail: luzinaliza99@mail.ru

МАНТУЛИНА Алина Валерьевна – аспирант кафедры селекции и озеленения, младший научный сотрудник лаборатории «Лесных экосистем». ORCID 0000-0001-7780-6633, Scopus Author ID 57485814600, ID РИНЦ 1119126.

660037, Проспект имени газеты Красноярский рабочий, д. 31, г. Красноярск, Красноярский край, Россия. E-mail: lina.mantulina@inbox.ru

MANTULINA Alina V. – PhD student of the Department of Selection and Landscaping, Junior researcher in the Laboratory for Forest Ecosystems. ORCID 0000-0001-7780-6633, Scopus Author ID 57485814600, ID РИНЦ 1119126.

660037. Prospekt imeni gazety Krasnoiarskii rabochii 31. Krasnoyarsk. Krasnoyarsk Territory. Russia. E-mail: lina.mantulina@inbox.ru