



Научная статья

УДК 630.5:582.475(1–925.12)

DOI: 10.37482/0536-1036-2023-3-9-20

## Детрит в высокополнотных сосновых насаждениях подтаежно-лесостепного района Средней Сибири

**А.А. Вайс<sup>1</sup>**, *д-р с.-х. наук, доц.*; *ResearcherID: AAC-7051-2019*,

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4965-3670>*

**Г.С. Вараксин<sup>2</sup>**, *д-р с.-х. наук, проф.*; *ResearcherID: HNJ-3503-2023*,

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4335-4784>*

**С.К. Мамедова<sup>1</sup>**, *аспирант*;

*ResearcherID: <https://www.webofscience.com/wos/author/record/3901476>*,

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9972-0021>*

**Е.А. Ануев<sup>1</sup>**, *аспирант*; *ResearcherID: AAU-5682-2021*,

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1822-0795>*

**О.А. Герасимова<sup>1</sup>**, *канд. с.-х. наук*; *ResearcherID: ABF-3094-2020*,

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6498-5986>*

<sup>1</sup>Сибирский государственный университет науки и технологий им. академика М.Ф. Решетнёва, просп. им. газеты «Красноярский рабочий», д. 31, г. Красноярск, Россия, 660037; [vais6365@mail.ru](mailto:vais6365@mail.ru), [mamedova\\_seva@mail.ru](mailto:mamedova_seva@mail.ru), [djekizion@mail.ru](mailto:djekizion@mail.ru), [goa.1903@yandex.ru](mailto:goa.1903@yandex.ru)

<sup>2</sup>Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, ул. Академгородок, д. 50/28, г. Красноярск, Россия, 660036; [varaksings@mail.ru](mailto:varaksings@mail.ru)

Поступила в редакцию 28.03.21 / Одобрена после рецензирования 23.06.21 / Принята к печати 25.06.21

**Аннотация.** В настоящее время наблюдается ряд процессов, которые обуславливают воздействие на лесные экосистемы таких неблагоприятных факторов, как лесные пожары, фитопатогенное и инвазивное влияние, изменение климатических условий (повышение температуры). Цель исследования – определение потенциального запаса древесной и углеродной составляющей детрита по основным категориям (сухостой, валеж и пни), а также прогнозирование количества древесных остатков в условиях подтаежно-лесостепного района Средней Сибири. Исследование крупного детрита проводилось в чистых по составу сосняках. В качестве учетной единицы использовалась круговая площадка постоянного радиуса. Запас сухостоя составил в сосняках 82 % от общего запаса крупного детрита, валежа – 16 % ( $1,5–18,3 \text{ м}^3 \cdot \text{га}^{-1}$ ), пней – 2 % ( $0–2,6 \text{ м}^3 \cdot \text{га}^{-1}$ ). Количество детрита не превысило 11 % от общего запаса древостоя. Качество условий местопроизрастания оказывает значительное влияние на запас детрита через интенсивность роста, поскольку в лучших условиях она выше. В древостоях I класса бонитета аккумулируется большая часть крупного древесного детрита (66,4 %), т. е. почти в 2 раза больше, чем в насаждениях, относящихся ко II классу, – 33,6 %. В высокополнотных древостоях (от 0,81 и выше) запас углерода сухостоя, валежа и пней в целом значительно выше, чем в среднеполнотных насаждениях (0,6–0,8). Возраст и средняя высота древостоя являются значимыми показателями для прогнозирования запасов древесины и углерода сухостоя.

© Вайс А.А., Вараксин Г.С., Мамедова С.К., Ануев Е.А., Герасимова О.А., 2023

Статья опубликована в открытом доступе и распространяется на условиях лицензии CC BY 4.0

Количество древесины и углерода валежа зависит также от полноты и общего запаса древесины в насаждении. Получены регрессионные уравнения, позволяющие спрогнозировать объем крупного древесного детрита. Таким образом, в исследуемых древостоях наблюдаются деструктивные процессы (крупный древесный детрит), которые вызваны как влиянием возрастной структуры (вступлением древостоев в стадию спелости и перестойности), так и биогенными факторами, причина которых – снижение устойчивости лесных массивов под воздействием патогенеза и климатических изменений.

**Ключевые слова:** крупный древесный детрит, сосна обыкновенная, запас крупного детрита, сухостой, валеж, пни, углерод, Средняя Сибирь

**Благодарности:** Исследование проводилось коллективом научной лаборатории «Лесных экосистем» в рамках госзадания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по реализации проекта «Оценка устойчивости лесных экосистем к изменению климата как основа мониторинга углеродного бюджета» (FEFE-2021-0018).

**Для цитирования:** Вайс А.А., Вараксин Г.С., Мамедова С.К., Ануев Е.А., Герасимова О.А. Детрит в высокополнотных сосновых насаждениях подтаежно-лесостепного района Средней Сибири // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 3. С. 9–20. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-3-9-20>

Original article

### Detritus Inside High Density Pine Stands in the Taiga Forest-Steppe Subzone of Central Siberia

**Andrey A. Vais**<sup>1✉</sup>, Doctor of Agriculture, Assoc. Prof.; ResearcherID: [AAC-7051-2019](https://orcid.org/0000-0003-4965-3670),  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4965-3670>

**Gennady S. Varaksin**<sup>2</sup>, Doctor of Agriculture, Prof.; ResearcherID: [HNJ-3503-2023](https://orcid.org/0000-0003-4335-4784),  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4335-4784>

**Sevinch K. Mamedova**<sup>1</sup>, Postgraduate Student;  
ResearcherID: <https://www.webofscience.com/wos/author/record/3901476>,  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9972-0021>

**Evgenij A. Anuev**<sup>1</sup>, Postgraduate Student; ResearcherID: [AAU-5682-2021](https://orcid.org/0000-0002-1822-0795),  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1822-0795>

**Olga A. Gerasimova**<sup>1</sup>, Candidate of Agriculture; ResearcherID: [ABF-3094-2020](https://orcid.org/0000-0001-6498-5986),  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6498-5986>

<sup>1</sup>Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, prosp. imeni gazety “Krasnoyarskiy Rabochiy”, 31, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation; [vais6365@mail.ru](mailto:vais6365@mail.ru)<sup>✉</sup>, [mamedova\\_ceva@mail.ru](mailto:mamedova_ceva@mail.ru), [djekizion@mail.ru](mailto:djekizion@mail.ru), [goa.1903@yandex.ru](mailto:goa.1903@yandex.ru)

<sup>2</sup>Sukachev Institute of Forest of SB RAS, ul. Akademgorodok, 50/28, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation; [varaksins@mail.ru](mailto:varaksins@mail.ru)

Received on March 28, 2021 / Approved after reviewing on June 23, 2021 / Accepted on June 25, 2021

**Abstract.** At the present time, certain harmful effects are observed that affect forest ecosystems. They are forest fires, phytopathogenic activities, and invasive influence, in addition to changes in climatic conditions, in particular an increase in temperature. The study is intended to determine the potential stock of wood and carbon compounds in detritus. The principal categories for it are snags, downed dead wood, and stumps. Additionally, it predicts the amount of wood residues in the conditions of the taiga forest-steppe subzone of Central



Siberia. A coarse woody detritus was examined in the structurally pure forests of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.). A circular area of constant radius was used as an accounting unit. The coarse woody detritus in snag was 82 %, in downed dead wood was 16 % ( $1.5\text{--}18.3\text{ m}^3\cdot\text{ha}^{-1}$ ), in stumps was 2 % ( $0\text{--}2.6\text{ m}^3\cdot\text{ha}^{-1}$ ). The content of detritus was found in only 11 % of the total stock of the stand. The environmental quality at the location of growth had a strong effect on the amount of detritus because of the growth rate of the trees, which is higher in the ideal conditions. Most of the coarse woody detritus (66.4 %) was accumulated in the stands of productivity class I, which was almost double that in the stands of productivity class II (33.6 %). The carbon content in snags, downed dead wood, and stumps was higher in high-density stands (0.81 or more) than in medium-density stands (0.6–0.8). The age and average height of the stand were considerable indicators for predicting stocks of wood and carbon in snags. The amount of wood and carbon in the downed dead wood also depended on the growth density and total stock of wood at the location. The regression equations were generated to predict the volume of the coarse wood detritus. According to the results, it can be concluded that in the investigated stands the destructive processes were identified, which were determined by the concentration of detritus. The production of detritus was activated by both age composition, when a major part of the trees enters the mature or overmature stages, and biogenic factors, which were stimulated by pathogenesis and climatic changes.

**Keywords:** coarse woody detritus, Scots pine (*Pinus sylvestris* L.), coarse woody detritus stock, snag, downed dead wood, stump, carbon, Central Siberia

**Acknowledgements:** The study was performed by the research laboratory team of “Forest Ecosystems” as a part of the state assignment from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation as implementation of the project “Assessment of Forest Ecosystems Resilience Under Climate Change as a Basis of Carbon Budget Monitoring” (FEFE-2021-0018).

**For citation:** Vais A.A., Varaksin G.S., Mamedova S.K., Anuev E.A., Gerasimova O.A. Detritus Inside High Density Pine Stands in the Taiga Forest-Steppe Subzone of Central Siberia. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2023, no. 3, pp. 9–20. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-3-9-20>

### Введение

Крупный древесный детрит (КДД) в виде крупных древесных остатков (КДО) или древесного опада играет важную роль в системе разложения мертвой древесины и углеродном балансе лесных экосистем [11, 19]. КДД лесного насаждения – это сухостой, пни, валеж диаметром в нижнем отрезе 10 см и более – мертвое древесное вещество (мортмасса) всех стадий разложения до перехода в гумус [19, 26]. Преобладающей частью детрита является запас сухостоя. Причины образования КДД различны – от естественных и незначительных (конкуренция, болезни, старение растений) до случайных и массовых (ветровалы, вспышки размножения вредителей, пожары и др.) [17]. В результате воздействия как природных (лесные пожары), так и антропогенных факторов (рубка насаждений, промышленное загрязнение) и ухудшения санитарного состояния насаждений на лесных территориях увеличиваются запасы КДД [1–3, 6, 22–24, 27, 28].

Вопросы исследования КДД находятся в центре внимания зарубежных и российских ученых. В.Г. Стороженко, изучая понятие «древесный отпад», предлагает считать его компонентом биоценоза под названием «мортценоз» [18]. Проблема оценки запасов мертвой древесины актуальна для определения эмиссии углерода и изучения процессов круговорота веществ в лесных экосистемах. Структурные особенности КДД важны с точки зрения оценки интенсивности

эмиссионных процессов. Ряд авторов считает, что детрит в сосновых насаждениях является критерием оценки санитарного состояния, экологической и пирологической характеристик [15, 16, 21, 25, 30].

Оценка лесных массивов средствами государственной инвентаризации лесов, научные изыскания исследователей позволили для Российской Федерации получить первичные данные о запасах древесного детрита [4, 9, 13, 18]. Д.Г. Замолотчиков, Н.В. Зукерт, О.В. Честных на основе анализа сведений Государственного лесного реестра установили, что углерод сухостоя составляет 21–42 % от общего пула КДО [7]. Оценка углерода валежа представлена в работах В.И. Грабовского (и др.), А.В. Иванова (и др.) N.A. Scott (et al.), L. Zhou (et al.) [5, 8, 29, 30]. С использованием коэффициентов для перевода объема в массу углерода получена средняя величина пула углерода валежа – 8,3 тС·га<sup>-1</sup> [8]. Выявлена тенденция к увеличению запасов углерода этой категории с возрастом насаждения.

Состояние вопроса показывает, что преимущественно исследования детрита сконцентрированы в европейской части РФ, по Сибирскому региону данных недостаточно и требуется дополнительное изучение запасов КДО.

Цель исследования – определение потенциального запаса древесной и углеродной составляющей детрита по основным категориям (сухостой, валеж и пни), а также прогнозирование количества древесных остатков в условиях подтаежно-лесостепного района Средней Сибири.

#### *Объекты и методы исследования*

Объект исследования – территория в прибрежной части р. Енисей, в пригородной зоне г. Красноярск. Местность расположена в условиях Средней Сибири в подтаежно-лесостепном районе. Основной лесообразующей породой здесь является сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.). Доля участия березы повислой (*Betula pendula* Roth.) и осины обыкновенной (*Populus tremula* L.) в сосновых древостоях незначительна, поэтому исследование КДД проводилось в чистых по составу сосняках.

В качестве учетной единицы использовалась круговая площадка постоянного радиуса [14]. Выбор обусловлен тем, что сосняки опытного объекта характеризуются высокими густотой и полнотой [10]. На каждом лесном участке закладывалось равномерно по площади по 3 круговых площадки. Радиус одной площадки составил 13,75 м (площадь – 594 м<sup>2</sup>). Работы по учету КДО выполнялись на территории 18 лесных участков с общим количеством площадок 54 шт. в период с 1 июля по 15 октября 2021 г. У каждого дерева в соответствии с традиционными методиками измерялись диаметр на высоте груди, высоты части растущих и сухостойных деревьев, устанавливалась категория состояния (1–5 категории). Данные учета затем объединялись и представлялись в итоговом виде.

Учет КДД осуществлялся в соответствии с методическими положениями [11]. Данные замеров записывались в специальную форму ведомости. В учет включались стволы сухостоя и валеж с диаметром у основания 10 см и более, длиной 1 м и более, а также пни хозяйственного происхождения с диаметром среза, превышающим 10 см. В случае, если ствол валежа попадал на площадку не полностью, учитывалась только его часть, расположенная на площадке. Объемы каждого ствола валежа и сухостоя, а также пней рассчитывались по таблицам объемов или при помощи других применяемых в лесной таксации способов.

Анализировалась площадочная характеристика лесных участков по запасу детрита ( $\text{м}^3 \cdot \text{га}^{-1}$ ), массе детрита ( $\text{т} \cdot \text{га}^{-1}$ ) и запасу углерода детрита ( $\text{тС} \cdot \text{га}^{-1}$ ).

Для определения массы детрита использовалась базисная плотность древесины (БП), являющаяся показателем степени разложения мертвой древесины:

$$M = Vd \cdot \text{БП},$$

где  $M$  – масса детрита,  $\text{т} \cdot \text{га}^{-1}$ ;  $Vd$  – запас детрита,  $\text{м}^3 \cdot \text{га}^{-1}$ .

Значения БП по главной породе (сосна) брались из справочного материала по детриту [11]. Так, БП сосны для сухостоя и пней составляет 0,316, для валежа – 0,234. Для перевода массы детрита в запас углерода мертвой древесины применялся конверсионный коэффициент (0,5).

После сбора данных выполнялась их камеральная обработка. Для этого использовались электронная таблица Excel, статистический пакет Statgraphics, «Справочник таксатора» [20] с нормативными таблицами, отражающими рост насаждений в условиях Средней и Южной Сибири.

### *Результаты исследования и их обсуждение*

На отдельных площадках запас сухостоя варьировал от 7,6 до 120,6  $\text{м}^3 \cdot \text{га}^{-1}$ , максимальное значение характерно для круговой площадки 9-го участка, где наблюдалось очаговое усыхание деревьев сосны. Запас валежа изменялся в меньшей степени – от 0 до 32,6  $\text{м}^3 \cdot \text{га}^{-1}$ . Минимальный запас детрита в сосновых древостоях приходился на пни – от 0 до 5,24  $\text{м}^3 \cdot \text{га}^{-1}$ , поскольку территория опытного объекта относится к защитным лесам и факты рубок носят ограниченный характер, присутствуют лишь пни от естественного изреживания. Для дальнейшего анализа данных использовались обобщенные характеристики лесных участков (табл. 1): запас сухостоя – 19,9–73,5  $\text{м}^3 \cdot \text{га}^{-1}$ , валежа – 1,5–18,3  $\text{м}^3 \cdot \text{га}^{-1}$ , пней – 0–2,6  $\text{м}^3 \cdot \text{га}^{-1}$ .

По данным других исследований, запас сухостоя в сосновых насаждениях России меняется в широких пределах [7, 11]. При этом средний показатель в управляемых лесах для условий лесостепной зоны Западной Сибири составляет 10,4  $\text{м}^3 \cdot \text{га}^{-1}$  [13]. В условиях хвойно-широколиственных насаждений Южного Приморья количество валежа – 17–83  $\text{м}^3 \cdot \text{га}^{-1}$  (17 % запаса). Среднее значение для условий лесостепной зоны Западной Сибири – 12,0  $\text{м}^3 \cdot \text{га}^{-1}$  [13], что в целом соответствует результатам наших исследований. Среднее значение запаса пней – 0,70  $\text{м}^3 \cdot \text{га}^{-1}$  [13].

Запас углерода сухостоя на всех пробных площадках варьировал от 0,9 до 19,0  $\text{тС} \cdot \text{га}^{-1}$ , валежа – от 0,2 до 3,8  $\text{тС} \cdot \text{га}^{-1}$ , пней – от 0,05 до 0,83  $\text{тС} \cdot \text{га}^{-1}$ . Средние показатели запаса углерода составили в сухостое 2,5–11,6  $\text{тС} \cdot \text{га}^{-1}$ , в валеже – 0,2–2,2  $\text{тС} \cdot \text{га}^{-1}$ , в пнях – 0,05–0,42  $\text{тС} \cdot \text{га}^{-1}$ . Запас углерода сухостоя преобладал на 9-м и 12-м лесных участках (11,6  $\text{тС} \cdot \text{га}^{-1}$ ), запас углерода валежа – на 14-м (2,2  $\text{тС} \cdot \text{га}^{-1}$ ), запас углерода пней – на 17-м (0,42  $\text{тС} \cdot \text{га}^{-1}$ ). В соответствии с другими источниками, количество сухостоя зависит от возраста насаждений и в спелых и перестойных сосняках России объем углерода в сухостое находится на уровне 8,9–13,2  $\text{тС} \cdot \text{га}^{-1}$  [7].

Суммарный запас углерода КДД, включая запас углерода в сухостое, валеже и пнях, свидетельствует о том, что данный показатель лесных участков находится в пределах 3,2–13,4  $\text{тС} \cdot \text{га}^{-1}$ . На 12-м участке наблюдался максимальный запас углерода в КДД – 13,4  $\text{тС} \cdot \text{га}^{-1}$ . По данным Э.А. Курбанова, О.Н. Кранкиной [12], в спелых сосняках Среднего Заволжья запас углерода КДД составил 8,6–24,5  $\text{тС} \cdot \text{га}^{-1}$ .

Таблица 1

Характеристика лесных участков и детрита на них  
Characteristics of forest trail plots and detritus on them

Номер участка	Тип леса	Возраст, лет	Полнота	Бонитет	Запас растущего леса, $\text{м}^3 \cdot \text{га}^{-1}$	Запас детрита, $\text{м}^3 \cdot \text{га}^{-1}$			Масса детрита, $\text{т} \cdot \text{га}^{-1}$			Запас углерода мертвой древесины, $\text{т} \cdot \text{га}^{-1}$			Всего
						С	В	П	С	В	П	С	В	П	
1	$\text{C}_{\text{спос}}$	105	0,61	I	235	29,3	1,8	1,02	9,3	0,4	0,32	4,6	0,2	0,16	5,0
2	$\text{C}_{\text{спос}}$	130	0,99	II	393	34,4	12,2	0,37	10,9	2,9	0,12	5,4	1,4	0,06	6,9
3	$\text{C}_{\text{спос}}$	150	0,98	II	425	22,6	8,4	0,35	7,1	2,0	0,11	3,6	1,0	0,06	4,6
4	$\text{C}_{\text{осрт}}$	130	1,04	I	419	23,4	5,0	0,70	7,4	1,2	0,22	3,7	0,6	0,11	4,4
5	$\text{C}_{\text{осрт}}$	170	0,71	II	282	19,0	7,4	1,04	6,0	1,7	0,33	3,0	0,9	0,16	4,0
6	$\text{C}_{\text{осрт}}$	140	1,28	II	517	33,6	13,6	0,63	10,6	3,2	0,20	5,3	1,6	0,10	7,0
7	$\text{C}_{\text{осрт}}$	105	1,42	I	570	49,5	14,8	0,23	15,6	3,5	0,07	7,8	1,7	0,04	9,6
8	$\text{C}_{\text{прос}}$	130	1,31	II	525	44,2	14,5	2,21	14,0	3,4	0,70	7,0	1,7	0,35	9,0
9	$\text{C}_{\text{осрт}}$	130	1,44	I	643	73,5	7,9	0,94	23,2	1,9	0,30	11,6	0,9	0,15	12,7
10	$\text{C}_{\text{осрт}}$	130	1,33	I	589	49,5	4,8	0,96	15,6	1,1	0,30	7,8	0,6	0,15	8,5
11	$\text{C}_{\text{спос}}$	130	0,80	I	353	48,1	10,8	0,35	15,2	2,5	0,11	7,6	1,3	0,06	8,9
12	$\text{C}_{\text{осрт}}$	120	0,89	I	390	73,5	14,3	0,56	23,2	3,3	0,18	11,6	1,7	0,09	13,4
13	$\text{C}_{\text{осрт}}$	115	0,93	I	375	61,0	1,5	0,47	19,3	0,3	0,15	9,6	0,2	0,07	9,9
14	$\text{C}_{\text{осрт}}$	130	1,32	I	533	32,5	18,6	0	10,3	4,3	0	5,1	2,2	0	7,3
15	$\text{C}_{\text{осрт}}$	130	1,21	II	464	19,9	18,3	0	6,3	4,3	0	3,1	2,1	0	5,3
16	$\text{C}_{\text{осрт}}$	130	0,64	II	231	15,9	5,4	0	5,0	1,3	0	2,5	0,6	0	3,2
17	$\text{C}_{\text{осрт}}$	130	1,05	I	461	29,5	18,2	2,63	9,3	4,3	0,83	4,7	2,1	0,42	7,2
18	$\text{C}_{\text{осрт}}$	130	1,11	II	464	21,6	4,2	0,68	6,8	1,0	0,21	3,4	0,5	0,11	4,0

Примечание:  $\text{C}_{\text{спос}}$ ,  $\text{C}_{\text{осрт}}$ ,  $\text{C}_{\text{прос}}$  – сосняки спрейно-осочковый, осочково-разногравный и прострелово-осочковый соответственно; С – сухой; В – валеж; П – пни.

Доля запаса углерода сухостоя от общего запаса углерода КДД – 82,2 %, валежа – 16,2 %, пней – 1,6 %. Запас детрита в зависимости от категории мертвой древесины (сухостой, валеж, пни) не превысил 11 % от запаса древостоя. Так, запас сухостоя в среднем составляет 8,7 % от запаса древостоя, запас валежа – 2,3 %, а запас пней – 0,2 %.

Для определения зависимости запаса углерода КДД от условий местопроизрастания данные распределялись по классам бонитета (табл. 1). Оказалось, что большая часть сухостоя приходится на I класс бонитета (69,0 % от запаса углерода всего сухостоя). Незначительная разница в запасах между двумя классами бонитета наблюдалась для валежа (I класс – 53,8 % и II класс – 46,2 % от общего запаса углерода валежа) и пней (I класс – 59,9 % и II класс – 40,1 % от запаса углерода пней) (рис. 1).

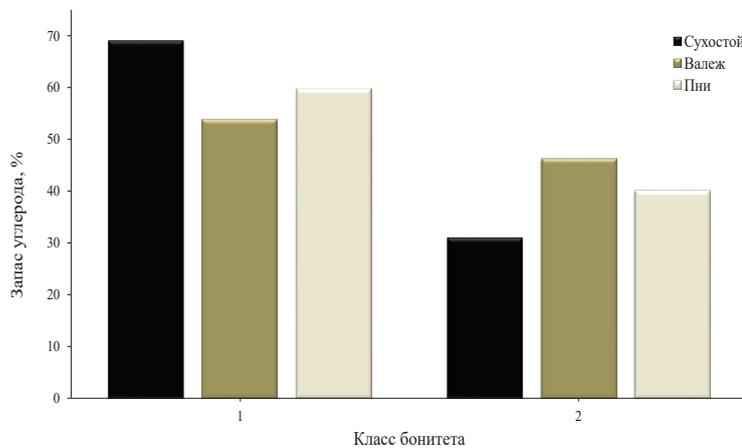


Рис. 1. Распределение запаса углерода детрита по классам бонитета

Fig. 1. Distribution of detritus carbon stock by productivity classes

В древостоях I класса бонитета больше отпада, так как сухостой составляет 56,7 % от общего запаса углерода КДД. Это можно объяснить тем, что лучшие условия произрастания и, соответственно, большая интенсивность роста деревьев обуславливают высокую вероятность изреживания и усыхания отдельных древесных пород. Конкуренция за площадь питания возрастает. В насаждениях, характеризующихся I классом бонитета, отмечается большая часть КДД (66,4 %), это почти в 2 раза выше, чем для древостоев II класса бонитета, – 33,6 %.

С целью оценки связи запаса углерода КДД и полноты древостоя использовалась как табличная (табл. 1), так и графическая (рис. 2) форма представления данных. Большая часть детрита сконцентрирована на тех лесных участках, где полнота древостоя выше 1,21. Зависимость запаса углерода детрита от полноты неоднозначна, но можно утверждать, что в высокополнотных древостоях (от 0,81 и выше) запас углерода сухостоя, валежа, пней в целом значительно выше, чем в среднеполнотных насаждениях (0,6–0,8). Установлено, что чем выше полнота ( $p$ ) древостоя, тем интенсивнее происходит процесс усыхания отдельных деревьев, приводящий к образованию отпада и КДО. При  $p > 1,21$  запас углерода сухостоя составляет 44,4 % от общего КДД данной категории, запас углерода валежа – 50,9 % (соответственно валежа), запас углерода пней – 37,8 % (применительно к пням) (рис. 2). Запас суммарного углерода КДД при  $p = 0,81–1,0$  – 26,6 %, а при  $p > 1,21$  – 45,4 %.

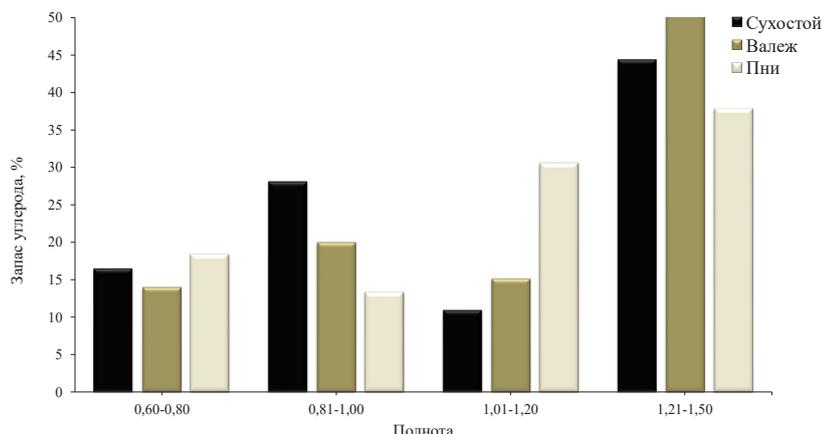


Рис. 2. Распределение запаса углерода детрита по соснякам разной полноты

Fig. 2. Distribution of detritus carbon stock by pine stand with various density

Прогнозирование запаса детрита и углерода в нем имеет важное значение для оценки эмиссионных процессов лесных экосистем. С этой целью на предварительном этапе с помощью корреляционного и факторного анализа отобраны значимые переменные для последующей регрессионной оценки КДД (табл. 2). Для прогнозирования запасов древесины и углерода сухостоя значимыми оказались две переменные: возраст и средняя высота древостоя, – которые определяют около 80 % всех факторов, влияющих на количество сухостоя. Возраст оценивает качественное состояние лесной экосистемы, а средняя высота – размерные параметры составляющей насаждения. Количество древесины и углерода валежа зависит от полноты и общего запаса древесины в насаждении (60 % из всего комплекса факторов влияния).

Таблица 2

**Регрессионные уравнения для оценки древесных ( $\text{м}^3\cdot\text{га}^{-1}$ ) и углеродных ( $\text{тС}\cdot\text{га}^{-1}$ ) запасов крупного детрита**  
**Regression equations for estimating wood ( $\text{м}^3\cdot\text{га}^{-1}$ ) and carbon ( $\text{тС}\cdot\text{га}^{-1}$ ) reserves of coarse woody detritus**

Уравнение	Коэффициент корреляции	Коэффициент детерминации, %
<i>Запас КДД</i>		
$Z_c = 0,751A + 5,275H$	0,90	81,3
$Z_b = 9,093p$	0,75	56,2
$Z_n = 0,032p$	0,54	28,8
<i>Запас углерода в КДД</i>		
$C_c = 0,008AH - 0,001A^2$	0,90	80,3
$C_b = 0,0043 + 2,838p^2 - 0,008p \cdot Z$	0,77	59,9

Примечание:  $Z_c \pm 19,4$ ;  $Z_b \pm 9,1$ ;  $Z_n \pm 1,2$  – запас сухостоя, валежа и пней соответственно с основной ошибкой ( $\pm$ ) при заданном уровне доверительной вероятности;  $C_c \pm 3,1$ ;  $C_b \pm 1,0$  – запас углерода в сухостое и валеже с основной ошибкой соответственно;  $A$  – возраст древостоя, лет;  $H$  – средняя высота, м;  $Z$  – запас древесины,  $\text{м}^3\cdot\text{га}^{-1}$ . Диапазон действия уравнений для  $A$  – 95–150 лет; для  $H$  – 19,8–25,8 м; для  $p$  – 0,53–1,64. Все коэффициенты уравнения значимы ( $p < 0,05$ ). Уровень доверительной вероятности – 95,4 %. Все уравнения достоверны ( $F_{\phi} \geq F_{\text{табл}}$ ;  $F_{\phi} = 21-113$ ).

Прогнозирование запаса древесины и углерода пней сложно выполнимо из-за случайности наличия данного объекта и многофакторности его образования. Если запас древесины пней частично определяется полнотой (29 %), то углерод древесной части пней целесообразно представить как среднюю величину ( $0,30 \text{ тС} \cdot \text{га}^{-1}$ ). На этом основании для установления запаса углерода пней (в случае их наличия на территории) предлагается использовать средний параметр:  $0,296 \pm 0,192 \text{ тС} \cdot \text{га}^{-1}$ , с изменчивостью признака  $V = 64,7\%$ . Оценка получена при уровне доверительной вероятности 95,4 %.

Регрессионные уравнения позволяют определить потенциальный объем эмиссионных процессов древесной части в сосняках подтаежно-лесостепного района Средней Сибири.

### *Заключение*

В настоящее время лесные пожары, фитопатогенное и инвазивное влияние, глобальное потепление обуславливают увеличение интенсивности отпада и формирование крупного древесного детрита. На основании проведенных исследований для чистых сосняков подтаежно-лесостепного района Средней Сибири получены данные о запасах древесного и углеродного пула крупных древесных остатков.

1. Запас сухостоя составляет в сосняках более 80 % от общего запаса крупного детрита. В абсолютных единицах такое значение превышает данные других исследователей о среднем запасе сухостоя более чем в 2 раза. Это объясняется наличием значительного числа высокополнотных насаждений, что является причиной дифференциации и изреживания древостоев.

2. Наши данные о количестве валежа и пней совпадают с данными, полученными другими учеными: запас валежа – 16 %, пней – 2 % от запаса детрита.

3. Качество условий местопроизрастания оказывает значительное влияние на запас детрита: в лучших условиях выше интенсивность роста, следовательно, в древостоях, относящихся к I классу бонитета, аккумулируется бóльшая часть КДД.

4. Запас углерода сухостоя, валежа, пней находится в прямой зависимости от полноты древостоя: чем она выше, тем выше запас углерода детрита (на примере сравнения высокополнотных и среднеполнотных древостоев).

Для прогнозирования запасов древесины и углерода сухостоя и валежа предлагается использовать парные и множественные линейные уравнения с достаточно высоким уровнем адекватности и достоверности. Запасы древесины и углерода пней целесообразно представить как средние величины.

Таким образом, выполнена оценка потенциального запаса древесной и углеродной составляющей детрита, а также представлены регрессионные уравнения для прогнозирования количества древесных остатков. В исследованных высокополнотных сосновых древостоях протекают деструктивные процессы – растет количество крупного древесного детрита, что обусловлено возрастной структурой древостоев (их вступлением в стадию спелости и перестойности), а также уменьшением устойчивости лесных массивов по причине патогенеза и климатических изменений.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Алейников А.А., Тюрин А.В., Грабарник П.Я., Ефименко А.С. Характеристика древостоя и валежа в послепожарных осиново-березовых лесах Среднего Предуралья // Лесоведение. 2018. № 4. С. 258–272.  
Aleynikov A.A., Tyurin A.V., Grabarnik P.Ya., Efimenko A.S. Features of the Stand and Deadwood in Postfire Aspen and Birch Forests in Northern Urals. *Lesovedenie* = Russian Journal of Forest Science, 2018, no. 4, pp. 258–272. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S0024114818040034>
2. Бергман И.Е., Воробейчик Е.Л., Усольцев В.А. Структура отпада елово-пихтовых древостоев в условиях загрязнения выбросами Среднеуральского медеплавильного завода // Сиб. лесн. журн. 2015. № 2. С. 20–32.  
Bergman I.E., Vorobeychik E.L., Usoltsev V.A. The Structure of Spruce-Fir Tree Stands Mortality Under Impact of the Middle Ural Copper Smelter Emissions. *Sibirskiy lesnoy zhurnal* = Siberian Journal of Forest Science, 2015, no. 2, pp. 20–32. (In Russ.). <https://doi.org/10.15372/SJFS20150202>
3. Бобкова К.С., Лиханова Н.В. Вынос углерода и элементов минерального питания при сплошнолесосечных рубках ельников средней тайги // Лесоведение. 2012. № 6. С. 44–54.  
Bobkova K.S., Likhanova N.V. Losses of Carbon and Mineral Nutrients in Clear Cuttings of Spruce Forests in the Middle Taiga. *Lesovedenie* = Russian Journal of Forest Science, 2012, no. 6, pp. 44–54. (In Russ.).
4. Ведрова Э.Ф., Кошурникова Н.Н. Масса и состав фитодетрита в темнохвойных лесах южной тайги // Лесоведение. 2007. № 5. С. 3–11.  
Vedrova E.F., Koshurnikova N.N. Mass and Composition of Phytodetrites in Dark Coniferous Forests of Southern Taiga. *Lesovedenie* = Russian Journal of Forest Science, 2007, no. 5, pp. 3–11. (In Russ.).
5. Грабовский В.И., Замолодчиков Д.Г. Модели оценки запасов валежа по данным учетов на трансектах // Лесоведение. 2012. № 2. С. 66–73.  
Grabovsky V.I., Zamolodchikov D.G. Models of Estimating Slash Reserves According to Data Obtained on Transects. *Lesovedenie* = Russian Journal of Forest Science, 2012, no. 2, pp. 66–73. (In Russ.).
6. Замолодчиков Д.Г. Оценка пула углерода крупных древесных остатков в лесах России с учетом влияния пожаров и рубок // Лесоведение. 2009. № 4. С. 3–15.  
Zamolodchikov D.G. Assessment of the Carbon Pool of Large Wood Residues in the Forests of Russia Considering the Impact of Fire and Logging. *Lesovedenie* = Russian Journal of Forest Science, 2009, no. 4, pp. 3–15. (In Russ.).
7. Замолодчиков Д.Г., Зукерт Н.В., Честных О.В. Подходы к оценке углерода сухостоя в лесах России // Лесоведение. 2011. № 5. С. 61–71.  
Zamolodchikov D.G., Zukert N.V., Chestnykh O.V. Methods for Evaluating Carbon in Dead Wood of Russian Forests. *Lesovedenie* = Russian Journal of Forest Science, 2011, no. 5, pp. 61–71. (In Russ.).
8. Иванов А.В., Приходько О.Ю., Демченко Р.В. Запасы валежа в естественных насаждениях хвойно-широколиственных лесов южного Приморья // Тр. СПбНИИЛХ. 2016. № 2. С. 17–28.  
Ivanov A.V., Prikhodko O.Yu., Demchenko R.V. Windfall Stock in the Natural Stands of Mixed Coniferous and Deciduous Forests in the South of Primorye. *Trudy SPB-NIILH* = Proceedings of SPBFRI, 2016, no. 2, pp. 17–28. (In Russ.). <https://doi.org/10.21178/2079-6080.2016.2.16>
9. Катица Е.А., Шорохова Е.В., Кузнецов А.А. Пул углерода крупных древесных остатков в коренных лесах северо-запада Русской равнины // Лесоведение. 2012. № 5. С. 36–43.

Kapitsa E.A., Shorokhova E.V., Kuznetsov A.A. Carbon Pool of Large Wood Residues in Native Forests of the Northwestern Russian Plain. *Lesovedenie* = Russian Journal of Forest Science, 2012, no. 5, pp. 36–43. (In Russ.).

10. Кокорина Е.Г., Вайс А.А. Эскиз таблицы хода роста модальных сосновых насаждений на основе принципов динамической типологии // Хвойные бореальной зоны. 2021. Т. 39, № 4. С. 257–262.

Kokorina E.G., Vais A.A. Sketches, Tables of Growth of Modal Pine Stands on the Principles of Dynamic Typology. *Hvojnye boreal'noj zony* = Conifers of the Boreal Area, 2021, vol. 39, no. 4, pp. 257–262. (In Russ.).

11. Кранкина О.Н., Поваров Е.Д. Методика определения запасов и массы древесного детрита на основе данных лесоустройства. Пушкино: ВНИИЛМ, 2002. 44 с.

Treifeld R.F., Krankina O.N., Povarov E.D. *Methodology for Determination of Woody Detritus Stocks and Weights According to Forest Surveying Data*. Moscow, VNIILM Publ., 2002, 44 p. (In Russ.).

12. Курбанов Э.А., Кранкина О.Н. Древесный детрит в сосновых насаждениях Среднего Заволжья // Изв. вузов. Лесн. журн. 2001. № 4. С. 28–33.

Kurbanov E.A., Krankina O.N. Wood Detritus in Pine Stands of Middle Volga Area. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2001, no. 4, pp. 28–33. (In Russ.). <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/c95/c9506e010d2474a12eba7ff43d6b1f06.pdf>

13. Малышева Н.В., Филипчук А.Н., Золина Т.А., Сильнягина Г.В. Количественная оценка запасов древесного детрита в лесах Российской Федерации по данным ГИЛ // Лесхоз. информ.: электрон. сетевой журн. 2019. № 1. С. 101–128.

Malysheva N.A., Filipchuk A.N., Zolina T.A., Silnyagina G.V. Quantitative Estimation of Woody Detritus Stocks in Forests of the Russian Federation According to the Global Forest Inventory. *Lesohozyajstvennaya informaciya* = Forestry Information, 2019, no. 1, pp. 101–128. (In Russ.). <https://doi.org/10.24419/LHI.2304-3083.2019.1.09>

14. Наставление по отводу и таксации лесосек в лесах Российской Федерации: утв. приказом Федер. службы лесн. хоз-ва РФ от 15 июня 1993 г. № 155.

Manual on Allocation and Inventory of Cutting Areas in the Forests of the Russian Federation. *Registered by the Federal Forestry Service of the Russian Federation on June 15, 1993, No. 155*. (In Russ.).

15. Павлов И.Н., Барабанова О.А., Кулаков С.С., Юшкова Т.Ю., Агеев А.А., Пашенова Н.В., Тарасов П.А., Шевцов В.В., Иванова Т.Н. К вопросу образования очагов куртинного усыхания сосны обыкновенной на старопахотных землях (роль корневой губки, эдафических факторов и изменения климата) // Хвойные бореальной зоны. 2010. Т. 27, № 3-4. С. 263–272.

Pavlov I.N., Barabanova O.A., Kulakov S.S., Yushkova T.Yu., Ageyev A.A., Pashenova N.V., Tarasov P.A., Shevtsov V.V., Ivanova T.N. On the Source Formation of Drying Clusters of Scots Pine on Old Arable Lands (Role of Root Fungus, Edaphic Factors, and Climate Change). *Hvojnye boreal'noj zony* = Conifers of the Boreal Area, 2010, vol. 27, no. 3-4, pp. 263–272. (In Russ.).

16. Портянко А.В., Залесов С.В., Данчева А.В. Древесный детрит в сосновых насаждениях Казахского мелкосопочника как показатель оценки санитарного состояния, экологической и пирологической характеристик // Леса России и хозяйство в них. 2011. № 4(41). С. 45–52.

Portyanko A.V., Zalesov S.V., Dancheva A.V. Woody Detritus in the Kazakh Hills of Pine Plantations as an Indicator of Health Status Assessment, Environmental and Pyrological Characteristics. *Lesa Rossii i hozyajstvo v nih* = Forests of Russia and Economy in Them, 2011, no. 4(41), pp. 45–52. (In Russ.).

17. Сергиенко В.Г., Власов Р.В., Иванов А.М. Общие вопросы сохранения биологического разнообразия в хвойных древостоях Северо-Запада России при проведении рубок // Тр. СПбНИИЛХ. 2015. № 2. С. 4–19.

Sergienko V.G., Vlasov R.V., Ivanov A.M. General Issues of Biodiversity Conservation in Coniferous Stands of Northwestern Russia at Wood Harvesting. *Trudy SPB-NILH = Proceedings of SPbFRI*, 2015, no. 2, pp. 4–19. (In Russ.).

18. *Стороженко В.Г.* Характеристика древесного опада в коренных ельниках восточноевропейской тайги // *Лесоведение*. 2012. № 3. С. 43–50.

Storozhenko V.G. Characterization of Current Deadwood and Slash in Natural Spruce Forests of East European Taiga. *Lesovedenie = Russian Journal of Forest Science*, 2012, no. 3, pp. 43–50. (In Russ.).

19. *Тарасов М.Е.* Роль крупного древесного детрита в балансе углерода лесных экосистем Ленинградской области: автореф. дис. ... канд. биол. наук. СПб., 1999. 21 с.

Tarasov M.E. *Role of Coarse Woody Detritus in Carbon Balance of Forest Ecosystems of the Leningrad Region*: Cand. Biol. Sci. Diss. Abs. Sankt Petersburg, SPbLTA Publ., 1999. 21 p. (In Russ.).

20. *Шевелев С.Л., Кузьмичев В.В., Павлов Н.В., Смольянов А.С.* Лесотаксационный справочник для южно-таежных лесов Средней Сибири. М.: ВНИИЛМ, 2002. 166 с.

Shevelev S.L., Kuzmichev V.V., Pavlov N.V., Smolyanov A.S. *Taxation Manual for the Southern Taiga Forests of Middle Siberia*. Moscow, VNIILM Publ., 2002. 166 p. (In Russ.).

21. Brown S. Measuring Carbon in Forests: Current Status and Future Challenges. *Environmental Pollution*, 2002, vol. 116, no. 3, pp. 363–372. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(01\)00212-3](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(01)00212-3)

22. Dickinson C.H., Pugh G.J.F. *Biology of Plant Litter Decomposition*. London, Academic Press Publ., 1974. 775 p.

23. Fridman J., Walheim M. Amount, Structure and Dynamics of Dead Wood on Managed Forestland in Sweden. *Forest Ecology and Management*, 2000, vol. 131, no. 1-3, pp. 23–36. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(99\)00208-X](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(99)00208-X)

24. Gore J.A., Patterson III W.A. Mass of Downed Wood in Northern Hardwood Forests in New Hampshire: Potential Effects of Forest Management. *Canadian Journal of Forest Research*, 1986, vol. 16, no. 2, pp. 335–339. <https://doi.org/10.1139/x86-057>

25. Harmon M.E., Sexton J. *Guidelines for Measurements of Woody Detritus in Forest Ecosystems*. USA, Seattle, WA. U.S. LTER Network Office Publ., 1996, no. 20. 73 p.

26. Harmon M.E., Franklin J.F., Swanson F.J., Sollins P., Gregory S.V., Lattin J.D., Anderson N.H., Cline S.P., Aumen N.G., Sedell J.R., Lienkaemper G.W., Cromack Jr. K., Cummins K.W. Ecology of Coarse Woody Debris in Temperate Ecosystems. *Advances in Ecological Research*, 1986, vol. 15, pp. 133–302. [https://doi.org/10.1016/S0065-2504\(08\)60121-X](https://doi.org/10.1016/S0065-2504(08)60121-X)

27. Krankina O.N., Harmon M.E. Dynamics of the Dead Wood Carbon Pool in Northwestern Russian Boreal Forests. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1995, vol. 82, no. 1-2, pp. 227–238. <https://link.springer.com/article/10.1007/BF01182836>

28. Norden B., Gotmark F., Tonneberg M., Ryberg M. Dead Wood in Semi-Natural Temperate Broadleaved Woodland: Contribution of Coarse and Fine Dead Wood, Attached Dead Wood and Stumps. *Forest Ecology and Management*, 2004, vol. 194, no. 1-3, pp. 235–248. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2004.02.043>

29. Scott N.A., Brown S. Measuring the Decomposition of Down Dead-Wood. *Field Measurements for Forest Carbon Monitoring*. Netherlands, Springer Publ., 2008. pp. 113–126. [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4020-8506-2\\_9](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4020-8506-2_9)

30. Zhou L., Dai L., Gu H., Zhong L. Review on the Decomposition, and Influence Factors of Coarse Woody Debris in Forest Ecosystem. *Journal of Forestry Research*, 2007, vol. 18, no. 1, pp. 48–54. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11676-007-0009-9>

**Конфликт интересов:** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов  
**Conflict of interest:** The authors declare that there is no conflict of interest

**Вклад авторов:** Все авторы в равной доле участвовали в написании статьи  
**Authors' Contribution:** All authors contributed equally to the writing of the article