

Научная статья

УДК 630*187:582.475

DOI: 10.37482/0536-1036-2022-4-25-38

Запасы и структура фитомассы древостоев северотаежных сосняков Республики Коми

А.Ф. Осипов[✉], канд. биол. наук, ст. науч. сотр.; *ResearcherID*: [P-9583-2015](https://orcid.org/0000-0003-0618-9660),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0618-9660>

И.Н. Кутявин, канд. с.-х. наук, науч. сотр.; *ResearcherID*: [P-9829-2015](https://orcid.org/0000-0002-7840-1934),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7840-1934>

А.В. Манов, канд. с.-х. наук, науч. сотр.; *ResearcherID*: [P-9089-2015](https://orcid.org/0000-0002-5070-0078),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5070-0078>

М.А. Кузнецов, канд. биол. наук, науч. сотр.; *ResearcherID*: [P-9870-2015](https://orcid.org/0000-0001-6331-9578),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6331-9578>

К.С. Бобкова, д-р биол. наук, гл. науч. сотр.; *ResearcherID*: [P-9476-2015](https://orcid.org/0000-0003-0346-2879),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0346-2879>

Институт биологии Коми научного центра УрО РАН, ул. Коммунистическая, д. 28, ГСП-2, г. Сыктывкар, Россия, 167982; osipov@ib.komisc.ru[✉], kutjavin-ivan@rambler.ru, manov@ib.komisc.ru, kuznetsov_ma@ib.komisc.ru, bobkova@ib.komisc.ru

Поступила в редакцию 16.10.20 / Одобрена после рецензирования 10.01.21 / Принята к печати 15.01.21

Аннотация. Цель исследования – оценить запасы фитомассы произрастающих в Республике Коми северотаежных сосняков зеленомошных и сфагновых типов. Работа выполнена в 2016–2019 гг. на постоянных пробных площадях, расположенных на территории Зеленоборского лесного стационара Института биологии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук. По данным модельных деревьев выведены степенные уравнения зависимости массы отдельных фракций от диаметра ствола на высоте 1,3 м для основных лесообразующих пород – сосна, ель, лиственница, береза, – принадлежащих к зеленомошным или сфагновым типам леса. Исследованные параметры характеризуются тесной корреляцией с высокими коэффициентами аппроксимации тренда ($R^2 = 0,72–0,92$). Рассчитан индекс листовой поверхности. Сосняки зеленомошных типов отличаются довольно высокими запасами фитомассы – 136–211 т/га. В древостоях сосняков сфагновых типов сосредоточено 89–96 т/га фитомассы. Несмотря на примесь других древесных пород, ведущий пул – деревья сосны, а основная фракция (46–56 %) – стволовая древесина. Ее вклад и ствола в целом (кора + древесина) выше в сосняках зеленомошных типов по сравнению со сфагновыми, тогда как доля корней в двух этих типах леса примерно одинакова. Участие крон деревьев (хвоя/листья + ветви) в общих запасах фитомассы сосновых насаждений на автоморфных почвах достоверно ниже (в среднем 17 %), чем в сообществах на полугидроморфных и гидроморфных почвах (в среднем 22 %). Относительно большая масса хвои и листьев стала причиной высокого индекса листовой поверхности, который изменялся от 8,8 до 17,8 и от 7,7 до 9,8 га/га соответственно в сосняках зеленомошных и сфагновых типов. Установлена высокая достоверная ($R = 0,88$; $p = 0,004$) взаимосвязь индекса листовой поверхности с суммой площадей сечений деревьев, тогда как с густотой и запасом древесины она статистически незначима. Рассчитаны конверсионные коэффициенты для перевода объема древесины в запасы фитомассы отдельных фракций и пород в целом.



Приведенные данные полезны для оценки продуктивности сосновых экосистем в разных условиях произрастания при проведении мониторинга лесов (в т. ч. методами дистанционного зондирования), а также при планировании лесохозяйственных мероприятий с целью повышения продуктивности сосновых лесов.

Ключевые слова: сосняк, фитомасса, северная тайга, Республика Коми, зеленомошный тип леса, сфагновый тип леса, индекс листовой поверхности, конверсионный коэффициент

Благодарности: Работа выполнена в рамках государственного задания Института биологии Коми НЦ УрО РАН по теме НИР «Зональные закономерности динамики структуры и продуктивности первичных и антропогенно измененных фитоценозов лесных и болотных экосистем европейского северо-востока России» (регистрационный номер 1021051101417-8-1.6.19). Авторы благодарят Н.В. Торлопову, А.И. Патова и С.И. Наймушину за помощь в проведении полевых работ.

Для цитирования: Осипов А.Ф., Кутявин И.Н., Манов А.В., Кузнецов М.А., Бобкова К.С. Запасы и структура фитомассы древостоев северотаежных сосняков Республики Коми // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 4. С. 25–38. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-4-25-38>

Original article

Reserves and Structure of Phytomass in Northern Taiga Pine Forest Stands in the Komi Republic

Andrey F. Osipov , Candidate of Biology, Senior Research Scientist;

ResearcherID: [P-9583-2015](https://orcid.org/0000-0003-0618-9660), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0618-9660>

Ivan N. Kutjavin, Candidate of Agriculture, Research Scientist;

ResearcherID: [P-9829-2015](https://orcid.org/0000-0002-7840-1934), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7840-1934>

Aleksey V. Manov, Candidate of Agriculture; Research Scientist;


ResearcherID: [P-9089-2015](https://orcid.org/0000-0002-5070-0078), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5070-0078>

Mikhail A. Kuznetsov, Candidate of Biology, Research Scientist;

ResearcherID: [P-9870-2015](https://orcid.org/0000-0001-6331-9578), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6331-9578>

Kapitolina S. Bobkova, Doctor of Biology, Chief Research Scientist;

ResearcherID: [P-9476-2015](https://orcid.org/0000-0003-0346-2879), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0346-2879>

Institute of Biology of Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, ul. Kommunisticheskaya, 28, GSP-2, Syktyvkar, Komi Republic, 167982, Russian Federation; osipov@ib.komisc.ru , kutjavin-ivan@rambler.ru, manov@ib.komisc.ru, kuznetsov_ma@ib.komisc.ru, bobkova@ib.komisc.ru

Received on October 16, 2020 / Approved after reviewing on January 10, 2021 / Accepted on January 15, 2021

Abstract. The research aims at estimating phytomass reserves of northern taiga green-moss and sphagnum pine forests growing in the Komi Republic. The study was carried out in pine forests at the Zelenoborsk forest research station of the Institute of Biology of Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (IB Komi SC UB RAS) in 2016–2019. We analyzed sample trees data and derived power equations of the dependence of the individual fractions weight on the stem diameter at the breast height (1.3 m) for the main forest-forming species (pine, spruce, larch, and birch) of green-moss and sphagnum forest types. The studied parameters are described by close correlation with high trend approximation coefficients ($R^2 = 0.72–0.92$). The leaf area index (LAI) is calculated. Green-moss pine forests



are characterized by rather large phytomass reserves, 136–211 t/ha. While in sphagnum pine forests there are 89–96 t/ha of phytomass. Despite the admixture of other wood species, the leading pool is represented by pine trees, and the main fraction (46–56 %) is wood of stem. The input of stem wood and stem as a whole (bark and wood) is greater in green-moss pine forests compared to sphagnum pine forests, while the share of roots in these two types is approximately the same. Participation of tree crowns (needles/leaves and branches) in the total phytomass reserves of pine stands on automorphic soils is significantly lower (17 % on average) than in communities on semihydromorphic and hydromorphic soils (22 % on average). The relatively greater mass of needles and leaves resulted in a high LAI, which varied from 8.8 to 17.8 and from 7.7 to 9.8 ha/ha, respectively, in green-moss and sphagnum pine forests. We found a high reliable ($R = 0.88$; $p = 0.004$) relationship between LAI and the tree basal areas sum, whereas it is statistically insignificant with density and wood supply. The conversion factors were calculated to convert timber volume into phytomass reserves of both individual fractions and species as a whole. The presented data are useful for assessing the productivity of pine ecosystems in different growing conditions during forest monitoring (including remote sensing methods) and also when planning forest management measures in order to increase the productivity of pine forests.

Keywords: pine forest, phytomass, northern taiga, Komi Republic, green-moss forest type, sphagnum forest type, leaf area index, conversion factor

Acknowledgements: This work was carried out within the framework of the state assignment of the Institute of Biology Komi SC UB RAS for the research topic “Zonal Regularities of the Structure and Productivity Dynamics of Primary and Anthropogenically Modified Phytocenoses of Forest and Bog Ecosystems of European North-East Russia” (registration number: 1021051101417-8-1.6.19). The authors are grateful to N.V. Torloпова, A.I. Patov and S.I. Naymushina for their assistance in the fieldwork.

For citation: Osipov A.F., Kutyavin I.N., Manov A.V., Kuznetsov M.A., Bobkova K.S. Reserves and Structure of Phytomass in Northern Taiga Pine Forest Stands in the Komi Republic. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2022, no. 4, pp. 25–38. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-4-25-38>

Введение

Фитомасса является важным показателем продуктивности лесов и рассматривается как экосистемная услуга, представляющая собой возобновляемые сырье и энергию, а также как резервуар углеродсодержащих парниковых газов [15, 27]. Параметры, характеризующие структуру фитомассы лесов, необходимы для мониторинга лесных экосистем, оптимального использования лесных ресурсов и рационального управления ими. При этом ограниченное количество измерений фитомассы может привести к существенным отклонениям в оценке ее структуры [22]. Как отмечено V.A. Usoltsev с соавт. [26], разнообразие лесорастительных условий делает определение запасов и структуры фитомассы древостоев труднопрогнозируемым, требует сложных в осуществлении прямых измерений, включающих рубку и фракционирование модельных деревьев.

Активное развитие получают методы дистанционного зондирования фитомассы лесных сообществ [18, 24]. Однако они нуждаются в калибровке и валидации по данным наземных исследований на постоянных и временных пробных площадях [14]. Эти сведения также требуются для разработки моделей и конверсионных коэффициентов зависимости фитомассы от таксационных показателей древостоев [6, 22].

Для мониторинга лесных экосистем посредством дистанционного зондирования необходима информация об индексе листовой поверхности, который является важнейшим показателем их функционирования, определяющим интенсивность энерго- и массообмена (потоки H_2O и CO_2) между поверхностью почвы и атмосферой и, следовательно, продукционный процесс насаждений [5]. Кроме того, индекс листовой поверхности служит ключевой структурной характеристикой, т. к. масса листвы отражает множество биологических процессов в кронах [16].

На Европейском Северо-Востоке России, объединяющем территории Республики Коми и Архангельской области, располагаются крупные массивы лесов, где сосняки произрастают на площади примерно 12 млн га. Исследования биологической продуктивности лесов в этом регионе проводятся на протяжении длительного времени. В результате достаточно хорошо освещены разные аспекты продукционного процесса и оценены запасы фитомассы в естественно развивающихся среднетаежных сосняках разных типов [3, 8–11 и др.], в искусственно созданных культурах сосны [1, 7]. Однако биологическая продуктивность северотаежных сосняков исследована слабо [3, 4].

Цель работы – оценить запасы фитомассы древостоев северотаежных сосняков разных типов в Северо-таежном лесном районе европейской части России на территории Республики Коми.

Объекты и методы исследования

Исследования выполнены в подзоне северной тайги на территории Зеленоборского лесного стационара Института биологии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук, относящегося к Северо-таежному лесному району европейской части России. Климат региона умеренно континентальный, умеренно холодный. Средняя годовая температура воздуха – $-1,6$ °С, января – $-18,8$ °С, июля – $+15,7$ °С. Количество поступающих осадков превышает испаряемость примерно в 1,5 раза и в среднем составляет 650 мм.

Сбор и анализ полученных материалов выполнены в 2016–2019 гг. Объектами послужили 8 постоянных пробных площадей (ППП), заложенных в сосняках зеленомошных и сфагновых типов. Проведена сплошная перечислительная таксация деревьев согласно общепринятым методам. Краткая таксационная характеристика сосняков дана в табл. 1.

Средневозрастные сосняки на ППП 4, 8, 19 имеют послерубочное происхождение, очистка лесосек паловая. Спелые сосняки на ППП 6, 11 и 17 развиваются после пожаров. В формировании состава древостоя при доминировании сосны также участвуют лиственница, ель, береза и осина. Древесный ярус сосняков зеленомошных типов характеризуется более сложным составом по сравнению со сфагновыми сосняками. Насаждения зеленомошных типов формируются на автоморфных глееподзолистых, гумусово-железисто-подзолистых почвах, а сфагновых – на торфяно-глеевых иллювиально-гумусово-железистых, песчаных и супесчаных, подстилаемых суглинками почвах.

Фитомассу древостоев оценивали методом модельных деревьев [13]. Проанализировано 56 модельных деревьев, в т. ч. 23 сосны, 15 елей, по 9 берез и лиственниц. Деревья отбирали за пределами ППП исходя из среднего диаметра деревьев в древостое и их распределения по ступеням толщины. 1–2 дерева были из ступени толщины, относящейся к среднему диаметру, 1–2 – из максимальной и минимальной ступеней толщины. Остальные деревья отбирали из промежуточных ступеней толщины.

Таблица 1

Краткая таксационная характеристика сосняков
Brief inventory description of pine forests

Тип леса (№ ППП)	Состав*	Густота, экз./га	Запас древесины, м ³ /га	Сумма площадей сечения, м ² /га	Бонитет	Возраст, лет**	Запас фитомассы, т/га	Структура фитомассы***
Зеленомошный (4)	8С1Е1Б+Ос ед.,Лц	3551	265	37,8	III	43–74	186,8±17,3	75С13Е8Б3Ос1Лц
Зеленомошный (6)	5С3Лц2Ос+Е,Б	790	277	29,2	IV	102–146	204,1±15,8	46С24Ос21Лц5Б4Е
Чернично-зеленомошный (8)	10С ед.,Лц,Е,Б	3620	225	31,0	IV	46–78	136,3±15,7	97С1Е1Лц1Б
Зеленомошный (11)	9С1Лц ед.,Е,Б	890	303	33,3	IV	104–133	209,6±23,2	85С11Лц2Е2Б
Чернично-зеленомошный (19)	8С2Ос+Б ед.,Е	3593	286	38,1	IV	48–69	179,6±16,9	74С21Ос4Б1Е
Долгомошно-сфагновый (15)	6С2Е2Б+Лц	2601	93	18,4	V	59–75	88,6±5,4	57С22Е16Б5Лц
Осоково-сфагновый (17)	10С+Б	1240	104	16,4	Va	72–238	88,8±10,4	98С2Б
Сфагновый (21)	9С1Е+Б	3336	121	23,1	V	51–171	95,9±8,3	88С7Е5Б

*Рассчитан по вкладу древесной породы в общий запас древесины. ** Приведен разброс значений для деревьев сосны. *** Приведена доля пород в общем запасе фитомассы древостоя.

Разделку моделей проводили в конце июля – начале августа. Дерево спиливали у шейки корня, а затем полностью разбирали по фракциям и взвешивали. Массу корней определяли методом мелких и крупных монолитов. Для установления влажности отдельных фракций, а также соотношений кора–древесина, хвоя–ветви отбирали образцы на разных высотах ствола с его разделением на 1-, 2-метровые секции и фракции «охвоенные ветви» с разных высот. После чего все отобранные образцы обрабатывали в камеральных условиях.

Для оценки фитомассы древостоев проанализировали ряд традиционно применяемых для этих целей [13, 28] регрессионных (логарифмическое, полиномиальное, степенное) уравнений связи массы отдельных фракций с диаметром ствола. Применены степенные уравнения зависимости массы отдельных компонентов фитомассы от диаметра ствола на высоте 1,3 м (табл. 2), выбранные в соответствии с анализом кривой, которая не должна пересекать ось абсцисс и давать отрицательные значения фитомассы, а также должна иметь небольшую величину стандартной ошибки уравнения регрессии (SEE) и высокий коэффициент детерминации (R^2).

Таблица 2

Характеристика уравнений ($y = aD^b$) зависимости массы отдельных фракций фитомассы (y , кг) от диаметра ствола (D , см) на высоте 1,3 м
Characteristics of the equations ($y = aD^b$) of the dependence of the individual phytomass fractions weight (y , kg) on the stem diameter (D , cm) at breast height

Порода	Тип леса	Фракция	Коэффициенты уравнения		R^2	SEE
			a	b		
Сосна	Зеленомошный	Хвоя	0,0487	1,7790	0,91	1,90
		Ветви	0,0088	2,5716	0,97	5,10
		Древесина ствола	0,0357	2,6346	0,94	20,80
		Кора ствола	0,0216	1,9788	0,97	0,90
		Корни	0,0348	2,3664	0,98	6,60
	Сфагновый	Хвоя	0,0148	2,2232	0,94	0,41
		Ветви	0,0074	2,7938	0,92	2,13
		Древесина ствола	0,0246	2,7509	0,99	4,79
		Кора ствола	0,0193	1,9665	0,96	0,05
Ель	Зеленомошный	Хвоя	0,2264	1,3548	0,91	1,25
		Ветви	0,1234	1,6137	0,86	2,31
		Древесина ствола	0,0477	2,5061	0,99	4,04
		Кора ствола	0,0143	2,2103	0,98	0,75
		Корни	0,0287	2,4521	0,99	1,90
	Долгомошный	Хвоя	0,0602	1,7704	0,88	1,53
		Ветви	0,0249	2,1742	0,88	2,66
		Древесина ствола	0,0704	2,3183	0,98	4,88
		Кора ствола	0,0304	2,0591	0,96	1,18

Окончание табл. 2

Порода	Тип леса	Фракция	Коэффициенты уравнения		R ²	SEE
			<i>a</i>	<i>b</i>		
Лиственница	Зеленомошный	Хвоя	0,0014	2,6120	0,94	0,54
		Ветви	0,0028	2,9399	0,95	1,77
		Древесина ствола	0,1096	2,2774	0,95	5,68
		Кора ствола	0,0357	2,1117	0,88	1,95
Береза	Зеленомошный	Листья	0,0282	1,4876	0,72	0,17
		Ветви	0,0094	2,4443	0,93	0,31
		Древесина ствола	0,1372	2,1225	0,92	2,38
		Кора ствола	0,0042	3,0340	0,87	1,36

Отмечено [13, 19], что использование степенных уравнений дает более точные оценки фитомассы. Запасы отдельных фракций осины рассчитывали по уравнениям, приведенным в [12], а массу корней лиственницы, березы и осины – по соотношению надземной и подземной частей, используя базу данных оценок фитомассы на ППП для исследуемых пород [25].

Индекс листовой поверхности определяли по массе листьев с применением переводных коэффициентов. Для сосны, ели и березы брали собственные данные [3], для осины и лиственницы – приведенные в [5]. Практический интерес имеет выведение конверсионных коэффициентов, т. е. отношений абсолютно сухой массы (т/га) конкретной фракции (или породы в целом) к запасу стволовой древесины, сконцентрированной в отдельной породе (м³/га).

Для сравнения фитомассы в сосняках зеленомошных и сфагновых типов применяли t-критерий Стьюдента в случае нормального распределения исходных данных и U-критерий Манна–Уитни в случае ненормального распределения. Нормальность распределения проверяли при помощи критерия Шапиро–Уилка. Статистическую обработку и анализ данных проводили в Microsoft Excel 2010 и программной среде R (версия 4.03) [20].

Результаты исследования и их обсуждение

Фитомасса древостоев. Запасы органического вещества фитомассы средневозрастных зеленомошных сосняков на дренированных почвах варьируют от 136 до 189 т/га, средневозрастных сфагновых сосняков на полугидроморфных и гидроморфных почвах – от 89 до 96 т/га. Довольно высокие показатели фитомассы (204–210 т/га) отмечены для спелых зеленомошных сосняков на ППП 6 и 11. Относительно высокая продуктивность средневозрастных древостоев на ППП 4 и 19, сопоставимая со спелыми, определяется большой густотой древесного яруса в этих сообществах.

Во всех исследованных насаждениях основной вклад в фитомассу древостоя вносит сосна, доля которой изменяется от 45 (ППП 6) до 98 % (ППП 8), формируя в среднем 75 % биомассы древесного яруса в сосняках зеленомошных типов. В этих насаждениях в накоплении органического вещества также значительны доли осины (в среднем 10 %) и лиственницы (в среднем 7 %),

тогда как доли ели и березы невысоки (в среднем по 4 %). Неблагоприятные условия произрастания сфагновых сосняков привели к более высокому участию (80 %) в аккумуляции органического вещества деревьев сосны. Доля ели в составе фитомассы составляет в среднем 10 %, березы – 7 %. Тонкомерные угнетенные деревья лиственницы выявлены только в долгомошно-сфагновом сосняке (ППП 15), где более благоприятные условия увлажнения, чем в сфагновых сосняках. В целом достоверных различий по вкладу отдельных пород между относящимися к неодинаковым типам леса древостоями не установлено ($p > 0,05$).

Основной фракцией, в которой сосредоточена примерно половина (46–56 %) органического вещества, накопленного древостоями, является стволовая древесина (рис. 1). Также значима в концентрации фитомассы (23–25 %) роль корней. Выявлено, что вклад стволовой древесины и ствола в целом (кора + древесина) в сосняках зеленомошных типов выше по сравнению со сфагновыми (t-критерий: $p = 0,039$ и $p = 0,012$ соответственно), тогда как доля корней в двух типах сосняков примерно одинакова (U-критерий: $p = 0,754$). Участие крон деревьев (хвоя/листья + ветви) в накоплении органического вещества насаждений на автоморфных почвах достоверно (t-критерий: $p = 0,013$) ниже (в среднем 17 %), чем в сообществах на полугидроморфных и гидроморфных почвах (в среднем 22 %), что, возможно, определяется невысокой полнотой древостоев в условиях переувлажнения почв. Также отметим, что в результате снижения меж- и внутривидовой конкуренции древесных растений сфагновых сосновых сообществ в данных типах леса создаются возможности для более активного освоения пространства кронами и корневой системой.

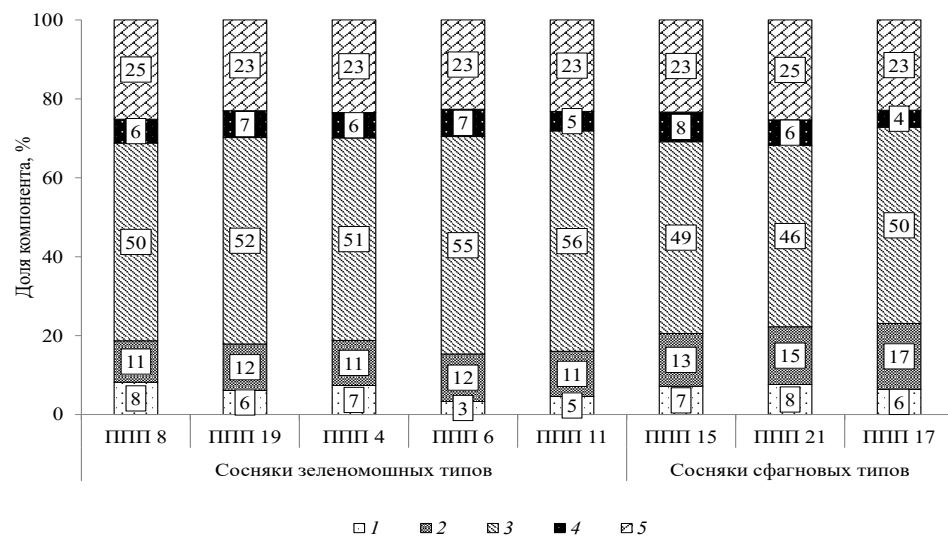


Рис. 1. Вклад отдельных фракций в общие запасы фитомассы: 1 – хвоя/листья; 2 – ветви; 3 – древесина ствола; 4 – кора ствола; 5 – корни (в рамке на диаграмме – доля компонента)

Fig. 1. Input of the individual fractions in total phytomass reserves: 1 – needles/leaves; 2 – branches; 3 – stem wood; 4 – stem bark; 5 – roots (the component share in the boxes of the diagram)

Сравнение результатов определения фитомассы исследуемых сосняков с содержащимися в литературе сведениями для насаждений, сходных по возрасту, отнесенности к типу леса и растительным зонам европейской части тайги, позволяет

оценить производительность древостоев северотаежных сосняков на территории Республики Коми. Так, по данным А.Д. Вакурова [4], запасы фитомассы в 90-летнем чернично-зеленомошном сосняке составляют 248 т/га, что на 15 % выше, чем в исследованных нами спелых зеленомошных сосняках. По сведениям ученого, масса 55-летнего черничного сосняка близка к биомассе средневозрастных зеленомошных сосняков в Республике Коми. Довольно близкие (46–82 т/га) нашим оценки фитомассы древесного яруса для заболоченных северотаежных сосняков этого региона получены А.А. Молчановым и А.Ф. Поляковой [9].

Запасы фитомассы в зеленомошных сосняках северной тайги сопоставимы или превышают массу древесного яруса в среднетаежных сосновых насаждениях Республики Коми. Так, среднетаежные черничные сосняки на автоморфных подзолистых почвах характеризуются относительно высокой продуктивностью и к 70-летнему возрасту накапливают 137–213 т/га фитомассы [2]. В предгорьях Урала в спелом черничном сосняке с незначительной (8 %) долей участия ели и березы аккумулируется 175 т/га органического вещества [8].

Как отмечено Р.В. Reich с соавт. [21], фитомасса в лесных сообществах уменьшается со снижением среднегодовой температуры воздуха. Однако небольшая разница в накоплении фитомассы древесного яруса сосняками северной и средней подзон тайги, вероятно, объясняется более сложным породным составом древостоев северотаежных сосняков. Это подтверждают и результаты исследований D. Sheil и F. Bongers [23], показывающие, что насаждения с большим разнообразием видов древесных растений в составе более продуктивны.

Увеличение продуктивности сосновых древостоев путем создания 2-го яруса из ели было предложено нами ранее [3]. Согласно данным табл. 1, древесный ярус исследованных сосняков зеленомошных типов формируют 4–5 видов древесных растений, тогда как в средней тайге – 3–4 вида при явном доминировании сосны.

Косвенным подтверждением приведенных данных может служить сравнение продуктивности древостоев сфагновых типов в подзонах средней и северной тайги Республики Коми. Так, фитомасса спелых и приспевающих среднетаежных сфагновых сосняков составляет 112–113 т/га [8, 11], что в 1,2–1,3 раза выше, чем в северотаежных. Следует отметить сходство видового состава древесных пород, формирующих древостои. В обеих подзонах тайги при более благоприятных условиях увлажнения древесный ярус образуют 4 вида древесных пород, при неблагоприятных – только 2.

Индекс листовой поверхности. Индекс листовой поверхности в исследованных средневозрастных зеленомошных сосняках довольно высок и изменяется от 15,0 до 17,8 га/га, превышая соответствующие показатели для средневозрастных насаждений сфагнового типа в 2,0–2,3 раза (рис. 2). Ведущая роль в формировании индекса листовой поверхности древостоев принадлежит хвое сосны. Ее доля в зеленомошных сосняках изменяется от 71 до 99 %, а в сфагновых – от 59 до 99 %. Также достаточно значимо участие хвои ели (в среднем 8 % в зеленомошных и 20 % в сфагновых типах). Полученные данные в 1,3–2,8 раза выше значений, приведенных ранее для средневозрастных северо- и среднетаежных сосняков [2, 3] региона, что, видимо, объясняется большей массой листвы высокополнотных древостоев исследуемых насаждений.

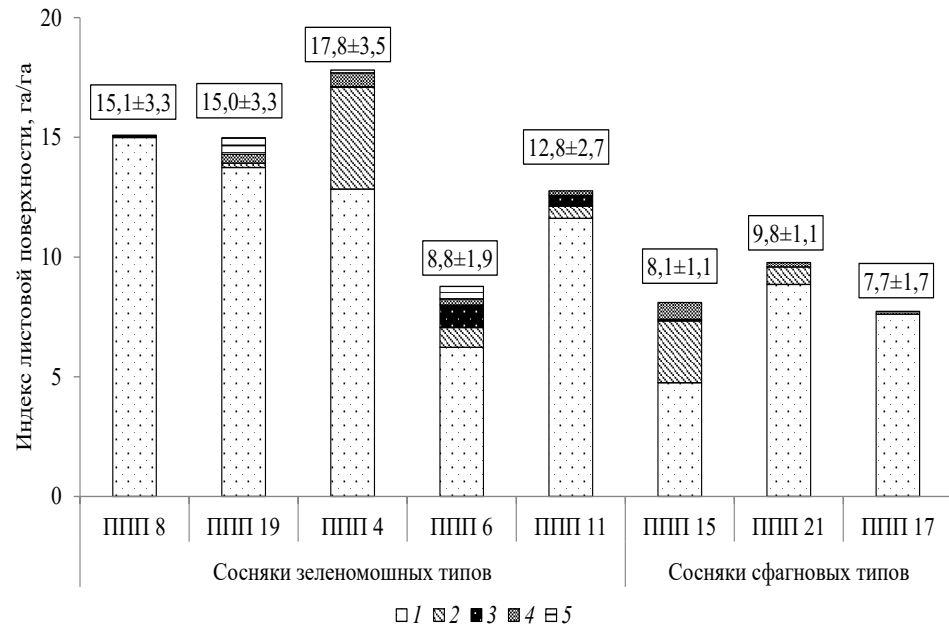


Рис. 2. Индекс листовой поверхности и вклад отдельных пород в его формирование в северотаежных сосняках: 1 – сосна; 2 – ель; 3 – лиственница; 4 – береза; 5 – осина

Fig. 2. LAI and input of individual species in its formation in northern taiga pine forests: 1 – pine; 2 – spruce; 3 – larch; 4 – birch; 5 – aspen

Для оценки индекса листовой поверхности по таксационным характеристикам древостоев мы проанализировали его взаимосвязь с густотой древостоев, запасом древесины и суммой площадей сечений в насаждении. Статистически достоверная взаимосвязь выявлена только с абсолютной полнотой ($R = 0,88$; $p = 0,004$), с количеством деревьев ($R = 0,59$; $p = 0,120$) и объемом стволовой древесины ($R = 0,66$; $p = 0,076$) связь отсутствует. Как отмечено А.В. Иванов с соавт. [17], в смешанных лесах Дальнего Востока индекс листовой поверхности коррелирует с суммой площадей сечения и запасом древесины, тогда как корреляция с густотой не установлена, что, вероятно, обусловлено концентрацией большей части фитомассы листвы в крупных деревьях. Таким образом, при накоплении значительного объема экспериментальных данных возможно выведение регрессионного уравнения зависимости, позволяющего оценивать индекс листовой поверхности по таксационным показателям насаждений без применения дорогостоящего оборудования.

Конверсионные коэффициенты перевода объема древесины древостоя в запасы фитомассы. В табл. 3 приведены конверсионные коэффициенты, характеризующие усредненные данные для сосновых древостоев зеленомошных и сфагновых типов. Выявлено, что для большинства фракций и древесных растений достоверных различий в конверсионных коэффициентах в зависимости от условий произрастания нет, исключение составляют кроны и корни деревьев сосны, а также древесина березы. Более высокие значения этого показателя наблюдались для сфагновых типов леса, что связано с замедленной скоростью роста в неблагоприятных условиях произрастания на полугидроморфных почвах.

Таблица 3

**Конверсионные коэффициенты для древесных растений
в северотаежных сосняках, кг/м³**

Conversion factors for woody plants in northern taiga pine forests, kg/m³

Порода	Фракция					Итого*
	хвоя/листья	ветви	древесина	кора	корни	
Сосна	41±8	71±7	<u>348±39</u>	<u>32±4</u>	156±6	649±40
	60±4	138±16	407±45	40±4	205±12	850±69
Ель	<u>123±37</u>	<u>116±30</u>	<u>321±57</u>	<u>49±10</u>	<u>171±31</u>	<u>780±154</u>
	94±36	122±22	433±67	85±25	233±26	968±177
Лиственница	<u>13±3</u>	<u>70±29</u>	<u>375±27</u>	<u>76±14</u>	<u>225±50</u>	<u>759±79</u>
	16	72	541	117	321	1068
Береза	<u>17±1</u>	<u>57±8</u>	383±39	<u>111±20</u>	<u>227±33</u>	<u>795±99</u>
	23±3	66±6	461±27	116±28	278±20	943±51
Осина	7±1	118±3	452±90	76±11	232±30	886±118

Примечание: В числителе даны конверсионные коэффициенты для зеленомошных типов сосняков (среднее ± стандартное отклонение), в знаменателе – для сфагновых. Полу-жирным шрифтом выделены фракции с достоверной разницей между типами сосняков.
* Конверсионный коэффициент древесной породы в целом без выделения фракций.

Более высокие конверсионные коэффициенты среди фракций характерны для стволовой древесины (321–461 кг/м³) и корней (156–278 кг/м³). Относительно высокие величины этих показателей отмечены у лиственных древесных растений. Меньшие значения (7–123 кг/м³) установлены для хвои/листьев. Максимальный коэффициент в этой фракции обнаружены у деревьев ели, обладающих развитой кроной. Полученные данные сопоставимы с конверсионными коэффициентами для основных видов древесных растений в условиях северной тайги, приведенными как для отдельных фракций, так и для древесных пород в целом Д.Г. Замолодчиковым с соавт. [6] и D. Schepaschenko с соавт. [22].

Заключение

Получены новые сведения, характеризующие структурно-функциональную организацию северотаежных сосняков. Древостои сосняков как зеленомошных, так и сфагновых типов являются смешанными по составу и формируются 4–5 видами древесных растений.

Впервые выведены регрессионные уравнения связи фитомассы отдельных фракций с диаметром ствола, позволяющие определять запасы органического вещества древостоев с учетом типов леса. Средневозрастные и спелые сосняки зеленомошных типов формируют древостои IV (редко III) классов бонитета с запасами фитомассы 136–211 т/га. Масса органического вещества в древостоях сфагновых сосняков составляет 89–96 т/га. Распределение фитомассы по фракциям соответствует закономерностям, полученным ранее для сосняков Севера, когда в качестве формирующих компонентов были выделены древесина ствола и корни. Установлена достоверно более высокая (в среднем 22 %; t-критерий: $p = 0,013$) доля фитомассы крон (ветви + хвоя) в сфагновых сосняках по сравнению с зеленомошными.

Для сосняков северной тайги Республики Коми листовой индекс составил 7,7–17,8 га/га и изменяется в соответствии с продуктивностью древостоя. Установлена достоверная ($R = 0,88$; $p = 0,004$) взаимосвязь индекса листовой поверхности с суммой площадей сечений деревьев. Рассчитаны конверсионные коэффициенты для оценки запасов фитомассы отдельных фракций и пород в целом по объему древесины. Приведенные данные полезны для характеристики продуктивности сосновых экосистем в разных условиях произрастания при проведении мониторинга лесов (в т. ч. методами дистанционного зондирования), а также при планировании лесохозяйственных мероприятий с целью повышения продуктивности сосновых лесов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Бабич Н.А., Мерзленко М.Д., Евдокимов И.В. Фитомасса культур сосны и ели в европейской части России. Архангельск, 2004. 112 с.
Babich N.A., Merzlenko M.D., Evdokimov I.V. *Phytomass of Pine and Spruce Plantations in the European Part of Russia*. Arkhangelsk, 2004. 112 p. (In Russ.).
2. Биопродукционный процесс в лесных экосистемах Севера / под ред. К.С. Бобковой, Э.П. Галенко. СПб.: Наука, 2001. 278 с.
Process of Bioproductivity in the North Forest Ecosystems. Ed. by K.S. Bobkova, E.P. Galenko. Saint Petersburg, Nauka Publ., 2001. 278 p. (In Russ.).
3. Бобкова К.С. Биологическая продуктивность хвойных лесов Европейского Северо-Востока. Л.: Наука, 1987. 156 с.
Bobkova K.S. *Biological Productivity of Coniferous Forests of the European North-East*. Leningrad, Nauka Publ., 1987. 156 p. (In Russ.).
4. Вакуров А.Д. Продуктивность сосняков в подзоне северной тайги // Продуктивность органической массы лесов в разных природных зонах. М., 1973. С. 7–25.
Vakurov A.D. Productivity of Pine Forests in Northern Taiga Subzone. *Productivity of Forest Organic Matter in Different Natural Zones*. Moscow, 1973, pp. 7–25. (In Russ.).
5. Грабовский В.В., Зукерт Н.В., Корзухин М.Д. Оценка индекса листовой поверхности для территории России по данным государственного лесного реестра // Лесоведение. 2015. № 4. С. 255–259.
Grabovskii V.V., Zukert N.V., Korzukhin M.D. Leaf Area Index Estimate for the Russian Territory Based on the State Forest Inventory. *Lesovedenie = Russian Journal of Forest Science*, 2015, no. 4, pp. 255–259. (In Russ.).
6. Замолодчиков Д.Г., Уткин А.И., Коровин Г.Н. Определение запасов углерода по зависимым от возраста насаждений конверсионно-объемным коэффициентам // Лесоведение. 1998. № 3. С. 84–93.
Zamolodchikov D.G., Utkin A.I., Korovin G.N. Determination of Carbon Reserves by Conversion-Volume Factors Related to the Age of Stands. *Lesovedenie = Russian Journal of Forest Science*, 1998, no. 3, pp. 84–93 (In Russ.).
7. Клевцов Д.Н., Тюкавина О.Н., Адаи Д.М. Биоэнергетический потенциал надземной фитомассы культур сосны обыкновенной таежной зоны // Изв. вузов. Лесн. журн. 2018. № 4. С. 49–55.
Klevtsov D.N., Tyukavina O.N., Adayi G.M. Bioenergy Potential of Aerial Phytomass of Scots Pine in the Middle Taiga Forest Region. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2018, no. 4, pp. 49–55. (In Russ.). <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2018.4.49>
8. Кутявин И.Н. Сосновые леса Северного Приуралья: строение, рост, продуктивность. Сыктывкар: ИБ Коми НЦ УрО РАН, 2018. 176 с.

Kutyavin I.N. *Pine Forests of the Northern Cis-Urals: Structure, Growth, Productivity*. Syktyvkar, IB Komi SC UB RAS Publ., 2018. 176 p. (In Russ.). <https://doi.org/10.31140/book-2018-02>

9. Молчанов А.А. Продуктивность органической массы в лесах различных зон. М.: Наука, 1971. 275 с.

Molchanov A.A. *Productivity of Organic Matter in Forests of Different Zones*. Moscow, Nauka Publ., 1971. 275 p. (In Russ.).

10. Молчанов А.А., Поляков А.Ф. Продуктивность органической массы в сосняках сфагновых // Продуктивность органической и биологической массы леса. М., 1974. С. 43–78.

Molchanov A.A., Polyakov A.F. Productivity of Organic Matter in Sphagnum Pine Forests. *Productivity of Organic and Biological Matter of the Forest*. Moscow, 1974, pp. 43–78. (In Russ.).

11. Осипов А.Ф. Биологическая продуктивность сосняков чернично-сфагновых средней тайги // Изв. вузов. Лесн. журн. 2013. № 1. С. 43–51.

Osipov A.F. Biological Productivity of Whortleberry-Sphagnum Pine Forests in Medium Boreal Taiga. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2013, no. 1, pp. 43–51. (In Russ.). <https://doi.org/10.7868/S0032180X13050110>

12. Тарасов С.И., Пристова Т.А., Бобкова К.С. Динамика фитомассы древостоя лиственно-хвойного фитоценоза средней тайги Республики Коми // Сиб. лесн. журн. 2018. № 1. С. 50–58.

Tarasov S.I., Pristova T.A., Bobkova K.S. Dynamics of Phytomass of a Tree Stand of the Deciduous-Coniferous Phytocenosis in Middle Taiga of Komi Republic. *Sibirskij Lesnoj Zhurnal = Siberian Journal of Forest Science*, 2018, no. 1, pp. 50–58. (In Russ.). <https://doi.org/10.15372/SJFS20180105>

13. Усольцев В.А. Биологическая продуктивность лесов Северной Евразии: методы, база данных и ее приложения. Екатеринбург: УрО РАН, 2007. 637 с.

Usoltsev V.A. *Biological Productivity of Forests in Northern Eurasia: Methods, Database and Its Supplements*. Yekaterinburg, UrB RAS Publ., 2007. 637 p. (In Russ.).

14. Щепашенко Д.Г., Швиденко А.З., Пергер К., Дресел К., Фриц Ш., Лакида П., Мухортובה Л.В., Усольцев В.А., Бобкова К.С., Осипов А.Ф., Мартыненко О.В., Карминов В.Н., Онтиков П.В., Щепашенко М.В., Кракнер Ф. Изучение фитомассы лесов: текущее состояние и перспективы // Сиб. лесн. журн. 2017. № 4. С. 3–11.

Schepaschenko D.G., Shvidenko A.Z., Perger C., Dresel C., Fritz S., Lakyda P. I., Mukhortova L.V., Usoltsev V.A., Bobkova K.S., Osipov A.F., Martynenko O.V., Karminov V.N., Ontikov P.V., Shchepashchenko M.V., Krahner F. Forest Biomass Observation: Current State and Prospective. *Sibirskij Lesnoj Zhurnal = Siberian Journal of Forest Science*, 2017, no. 4, pp. 3–11 (In Russ.). <https://doi.org/10.15372/SJFS20170401>

15. Bukvareva E., Zamolodchikov D., Grunewald K. National Assessment of Ecosystem Services in Russia: Methodology and Main Problems. *Science of the Total Environment*, 2019, vol. 655, pp. 1181–1196. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.286>

16. Calders K., Origo N., Disney M., Nightingale J., Woodgate W., Armston J., Lewis Ph. Variability and Bias in Active and Passive Ground-Based Measurements of Effective Plant, Wood and Leaf Area Index. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, vol. 252, pp. 231–240. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.01.029>

17. Ivanov A.V., Pokamestova V.Yu., Kasatkin A.S., Zamolodchikov D.G. Leaf Area Indices of Forest Stands in Natural and Disturbed Forests of Primorsky Krai. *Russian Journal of Ecology*, 2020, vol. 51, iss. 4, pp. 299–305. <https://doi.org/10.1134/S1067413620040086>

18. Lu D. The Potential and Challenge of Remote Sensing-Based Biomass Estimation. *International Journal of Remote Sensing*, 2006, vol. 27, iss. 7, pp. 1297–1328. <https://doi.org/10.1080/01431160500486732>

19. Payne N.J., Allan Cameron D., Leblanc J.-D., Morrison I.K. Carbon Storage and Net Primary Productivity in Canadian Boreal Mixedwood Stands. *Journal of Forestry Research*, 2019, vol. 30, iss. 5, pp. 1667–1678. <https://doi.org/10.1007/s11676-019-00886-0>
20. *R Core Team*. R: A Language and Environment for Statistical Computing. Vienna, R Foundation for Statistical Computing, 2020. Available at: <http://www.r-project.org/index.html> (accessed 16.10.20).
21. Reich P.B., Luo Y., Bradford J.B., Poorter H., Perry Ch.H., Oleksyn J. Temperature Drives Global Patterns in Forest Biomass Distribution in Leaves, Stems, and Roots. *PNAS*, 2014, vol. 111, no. 38, pp. 13721–13726. <https://doi.org/10.1073/pnas.1216053111>
22. Schepaschenko D., Moltchanova E., Shvidenko A., Blyshchyk V., Dmitriev E., Martynenko O., See L., Kraxner F. Improved Estimates of Biomass Expansion Factors for Russian Forests. *Forests*, 2018, vol. 9, iss. 6, art. 312. <https://doi.org/10.3390/f9060312>
23. Sheil D., Bongers F. Interpreting Forest Diversity-Productivity Relationships: Volume Values, Disturbance Histories and Alternative Inferences. *Forest Ecosystems*, 2020, vol. 7, art. 6. <https://doi.org/10.1186/s40663-020-0215-x>
24. Shobairi S.O.R., Usoltsev V.A., Chasovskikh V.P. Vegetation Fractional Coverage (VFC) Estimation of Planted and Natural Zones Based on Remote Sensing. *American Journal of Environmental Policy and Management*, 2018, vol. 4, no. 1, pp. 21–31.
25. Usoltsev V.A. *Forest Biomass and Primary Production Database for Eurasia*. Yekaterinburg, USFEU Publ., 2020. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.29991.70568>
26. Usoltsev V.A., Chasovskikh V.P., Noritsina Yu.V., Kokh E.V. Methods and Results of Studying the Geographical Trends in the Structure of Single-Tree Biomass of Larches and Two-Needled Pines in Eurasia. *Russian Journal of Ecology*, 2016, vol. 47, pp. 442–452. <https://doi.org/10.1134/S1067413616050143>
27. Yemshanov D., McKenney D.W., Hope E., Lempriere T. Renewable Energy from Forest Residues – How Greenhouse Gas Emission Offsets Can Make Fossil Fuel Substitution More Attractive. *Forests*, 2018, vol. 9, iss. 2, art. 79. <https://doi.org/10.3390/f9020079>
28. Zianis D., Muukkonen P., Mäkipää R., Mencuccini M. *Biomass and Stem Volume Equations for Tree Species in Europe*. Silva Fennica Monographs 4, 2005. 63 p. <https://doi.org/10.14214/sf.sfm4>

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