ТРУДЫ САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО
ИНСТИТУТА ЛЕСНОГО ХОЗЯЙСТВА

www.journal.spb-niilh.ru
ISSN 2079-6080

DOI 10.21178/2079-6080.2024.2.40
УДК 630*52

Фотограмметрия в стационарных исследованиях сосновых древостоев на территории Мурманской области

© А.П. Богданов[1,2], И.В. Цветков[1,2], С.В. Третьяков[1,2], С.В. Коптев[1,2]

Photogrammetry in stationary studies of pine stands in the Murmansk region

A.P. Bogdanov, I.V. Tsvetkov, S.V. Tretyakov, S.V. Koptev (Federal State Budget Institution «Northern Research Institute of Forestry»; Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov)

In order to improve forest evaluation standards to improve the accuracy of forest taxation work, a survey of stationary sample plots established in pine forests in the Murmansk region was carried out. As a result of silvicultural and taxation survey of objects, features of the of tree stands structure, characteristics of the shape of trunks, and interpretative signs of the studied tree stands were identified. A total of 10 sample plots were studied in lingonberry and lichen forest types. The trial plots are represented by forest stands of varying densities, quality classes IV–Va and the age of the forest stands ranging from 57 to 97 years. To obtain data on the stem form index and stem shape coefficients, measurements were carried out in 60 model trees.

The dependences of multiplication height and stem form index on stem height, relative stand density on crown density, as well as taxation diameter on crown width and tree height are considered. Regression analysis methods were used to establish dependencies.

Traditional methods widely used in forestry and forest taxation were used in field work. A photogrammetric method was used to study tree trunks forms, in which measurements were taken from photographs. The method used makes it possible to measure diameters at relative heights, determine the height and diameter of the crown, which increases efficiency, and also monitor forest ecosystems without cutting down model trees.

A linear dependence of the species height on the height of the Scots pine in the study area was revealed ($r = 0.8$). One of the main indicators of the stand is the taxation stem diameter. For its determination, an equation was obtained depending on the diameter of the crown and the height of the tree trunk, characterized by a high closeness of connection ($r = 0.8$), is obtained. A weak dependence of relative completeness on the closeness of the stand was revealed (0.3). The photogrammetric method for determining trunk parameters makes it possible to significantly speed up the process of obtaining data on model trees up to 17 meters high with the specified parameters of the focal length and the basis of photographing.

Key words: pine, stem form index, stem shape, model trees, photogrammetry, diameter, height, crown diameter, equations

Фотограмметрия в стационарных исследованиях сосновых древостоев на территории Мурманской области

А.П. Богданов, И.В. Цветков, С.В. Третьяков, С.В. Коптев

В целях совершенствования лесотаксационных нормативов для повышения точности оценки насаждений обследованы стационарные пробные площади, заложенные в сосняках на территории Мурманской области. В результате лесоводственно-таксационного обследования объектов выявлены особенности строения древостоев, характеристики формы стволов, дешифровочные признаки изучаемых насаждений. В общей сложности исследовано 10 пробных площадей в брусничном и лишайниковом типах леса. Пробные площади представлены лесными насаждениями различной густоты, IV–Va классов бонитета и возрастом 57–97 лет. Для получения данных о видовом числе и коэффициентах формы выполнены измерения у 60 модельных деревьев. Рассмотрены зависимости видовой высоты от высоты, относительной полноты от сомкнутости крон, а также таксационного диаметра – от ширины кроны и высоты деревьев. Для установления зависимостей применялись методы регрессионного анализа. В процессе полевых работ использовались традиционные методы, широко распространенные в лесоводстве и лесной таксации. Для изучения формы стволов был задействован фотограмметрический метод, при котором искомые показатели найдены по фотографиям. Этот метод позволяет измерять диаметры на относительных высотах, высоту дерева, диаметр кроны, что повышает эффективность, а также – выполнять мониторинг лесных экосистем без рубки модельных деревьев. Выявлена линейная зависимость видовой высоты от высоты сосны обыкновенной на исследуемой территории ($r = 0{,}8$). Одним из основных таксационных показателей древостоя является диаметр ствола. Для его определения получено уравнение зависимости от диаметра кроны и высоты ствола, характеризующееся высокой теснотой связи ($r = 0{,}8$). Выявлена слабая зависимость относительной полноты от сомкнутости древостоя ($r = 0{,}3$). Фотограмметрический метод определения параметров ствола позволяет значительно ускорить процесс получения данных о модельных деревьях высотой до 17 метров при заданных параметрах фокусного расстояния и базиса фотографирования.

Ключевые слова: сосна, видовое число, форма ствола, модельные деревья, фотограмметрия, диаметр, высота, диаметр кроны, уравнения связи

Богданов Александр Петрович – старший научный сотрудник; доцент кафедры лесоводства и лесоустройства, канд. с.-х. наук
E-mail: a.p.bogdanov@sevniilh-arh.ru

Цветков Илья Васильевич – старший научный сотрудник; доцент кафедры лесоводства и лесоустройства, канд. с.-х. наук
E-mail: i.tsvetkov@narfu.ru

Третьяков Сергей Васильевич – главный научный сотрудник; профессор кафедры лесоводства и лесоустройства, д-р с.-х. наук
E-mail: s.v.tretyakov@narfu.ru

Коптев Сергей Викторович – главный научный сотрудник; заведующий кафедрой лесоводства и лесоустройства, д-р с.-х. наук
E-mail: s.koptev@narfu.ru

[1]ФБУ «Северный научно-исследовательский институт лесного хозяйства»
163062, г. Архангельск, ул. Никитова, д. 13, Российская Федерация

[2]ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова»
163002, г. Архангельск, ул. Набережная Северной Двины, д. 17, Российская Федерация

Введение

Целью исследования является совершенствование нормативов таксации естественных насаждений сосны на территории Мурманской области.

Задачами исследования являются выявление особенностей таксации указанных древостоев и установление зависимостей для разработки математических моделей, характеризующих связь дешифровочных признаков с некоторыми таксационными показателями, такими как видовая высота, таксационный диаметр, относительная полнота древостоя. При проведении работ использованы традиционные методы сбора полевых материалов, однако для получения характеристик формы ствола необходима рубка модельных деревьев, что недопустимо в защитных лесах, ОЗУ и на стационарных объектах исследования. Кроме того, рубка и обмер моделей является трудоемкой задачей, а дневная норма выработки для 4 человек составляет 17 штук при их диаметре 12–20 см. Для повышения эффективности применен фотограмметрический метод, заключающийся в обработке фотографии и определении значений диаметров на относительных высотах и установление значений диаметров.

В результате работы собраны данные о 60 модельных деревьях. Полученные зависимости видовой высоты от высоты дерева схожи с теми, что приведены в справочной литературе. Выявление дешифровочных особенностей сосновых древостоев является актуальной задачей. Отмечается тесная связь диаметра на высоте груди с диаметром кроны и высотой ствола дерева.

Объекты и методы исследования

Для получения данных о строении древостоев с преобладанием сосны в естественных условиях брусничного и лишайникового типов леса, а также объективных материалов о таксационных показателях насаждений были проведены полевые исследования на постоянных пробных площадях, заложенных в 267 квартале Оленегорского участкового лесничества Мончегорского лесничества Мурманской области. Стационарные объекты исследования относятся к генетическому резервату, который расположен в границах регионального заказника «Симбозерский».

Пробные площади закладывались с учетом ОСТ 56–69–83 «Площади пробные лесоустроительные» и разработанных рекомендаций, представленных в пособии: «Закладка и таксация и описание пробных площадей при проведении научных исследований ...» [8]. Объем выполняемых работ определялся целями исследования. Объем статистической выборки для получения достоверных значений таксационных показателей выполнен с учетом особенностей строения древостоев [3]. Всего обследовано 10 пробных площадей с количеством деревьев на них от 182 до 994 шт.

На пробных площадях выполнялся комплекс лесоводственно-таксационных работ. С целью определения таксационных характеристик на каждой пробной площади осуществлен сплошной перечет деревьев по породам с разделением стволов на деловые, полуделовые и дровяные [8]. Измерения диаметров проводили вилкой мерной Haglof на высоте 1,3 метра от шейки корня с точностью до 1 мм. Для определения средней высоты древесного яруса замеряли высоты 10–15 деревьев из категории деловых, взятых репрезентативно для всех ступеней толщины. Для определения высот использовался высотомер Haglof. Возраст основного элемента леса произведен путем подсчета годичных слоев на кернах, взятых с помощью возрастного бурава у шейки корня у 10 деревьев, близких по своим параметрам к средним. Средняя высота определялась по уравнению связи для дерева среднего диаметра. Сомкнутость полога определялась точечным способом на линиях протяженностью 200 метров [8].

Для изучения формы стволов сосны определяли коэффициенты формы, видовые числа и видовые высоты. Полученные видовые числа сравнивались с данными, приведенными в региональных нормативных справочниках [4, 5].

Исследуемые участки расположены в защитных лесах, поэтому рубка модельных деревьев не проводилась.

Исследуемые насаждения являются чистыми по составу и имеют высокую продуктивность. Таксационная характеристика древостоев приведена в таблице 1.

Таблица 1

Таксационная характеристика древостоев на пробных площадях

Номер пробной площади	Класс бонитета	Тип леса	Количество деревьев, шт./га	Средние значения			Сумма площадей сечений, $м^2$/га	Сомкнутость крон	Относительная полнота	Запас, $м^3$/га	
				Возраст, лет	Высота, м	Диаметр, см				Растущей древесины	Сухой древесины
1	IV	С. бр	864	97	15,4	19,8	26,7	0,58	0,9	210	3
2	IV	С. бр	876	85	15,3	19,4	25,8	0,61	0,8	199	1
3	V	С. бр	1672	88	13,8	15,7	32,2	0,60	1,1	231	13
4	V	С. бр	3615	81	12,6	11,6	38,2	0,79	1,4	257	10
5	Va	С. бр	4815	91	11,6	10,4	41,2	0,64	1,6	271	8
6	V	С. бр	3356	84	13,1	12,2	39,1	0,64	1,4	274	9
7	IV	С. бр	3213	69	11,3	11,6	33,8	0,74	1,3	208	1
8	IV	С. бр	2592	66	12,4	12,8	33,5	0,63	1,3	227	2
9	III	С. лиш	910	57	13,3	14,6	15,2	0,55	0,5	110	0
10	IV	С. лиш	1200	80	16,0	17,2	27,9	0,65	0,9	227	7

Обзор литературных источников [9–15] свидетельствует об успешном опыте использования фотограмметрического метода для установления характеристик отдельных деревьев. Для работы могут применяться как две фотографии, так и серии фотографий для формирования объемной модели ствола дерева [14]. Дистанция съемки, устанавливаемое опытным путем, также имеет важное значение. Расстояние может варьировать в зависимости от задач исследования, например, фиксированное 18,5 м [13], или равное высоте изучаемого объекта [11], а также в зависимости от фокусного расстоянии от 15 м (при установленном объективе 28 мм) до 20 м (объектив 35 мм) [10]. Определение высоты и диаметра ствола дерева на различных высотах с помощью фотограмметрии имеет преимущества в скорости проведения работ [1, 12] и небольшой погрешности, сопоставимой с точностью применяемых инструментов [10, 15]. Основное достоинство данного способа в нашем случае – это оставление модельных деревьев на корню.

Для определения параметров, характеризующих форму ствола, использованы фотографии, полученные с помощью цифровой камеры Canon-EOS 1300 с фокусным расстоянием 24 мм и базисом фотографирования 15 м. Исправление вертикального искажения (дисторсии) осуществлено с помощью программного обеспечения Photoshop. Для определения масштаба на каждой фотографии приведена вешка высотой 4 или 4,5 м, а также измерены диаметры на высоте 1,3 м и у шейки корня мерной вилкой.

Измерения диаметров на относительных высотах выполнены с помощью возможностей программного обеспечения CorelDRAW. Численные значения, полученные с цифровых фотографий, занесены в таблицу Excel с целью дальнейшей обработки.

Объем ствола вычислен по сложной формуле Смолиана. Старое видовое число и коэффициенты формы определены по общеизвестным формулам [7].

Исследование взаимосвязей между показателями древостоев и стволов сосны проводилось методами регрессионного анализа с использованием программного обеспечения Statistica. В результате были получены коэффициенты уравнений взаимосвязи между диаметром, высотой и размером кроны дерева, относительной полнотой и сомкнутостью, высотой и видовой высотой стволов сосны. Для оценки регрессионных уравнений применялись критерий Фишера (F) и коэффициент детерминации (R^2).

На рисунке 1 приведен фрагмент фотографии с нанесенной отметкой на высоте груди (А) и общий вид модельного дерева с вешкой и нанесенными отметками на относительных высотах (Б).

А Б

—— отметка на относительной высоте 0,1Н;
– – – – отметка на высоте 1,3 м

Рис. 1. Окно оцифровки ствола дерева с отметками на относительных высотах:
А – на относительной высоте 0,1Н и на высоте груди; Б – общий вид модельного дерева с вешкой и нанесенными отметками на относительных высотах

В таблице 2 приведены параметры ствола и кроны дерева, полученные по указанной методике.

Таблица 2

Сводные характеристики модельных деревьев

№ п/п	Таксационный диаметр, см	Диаметр у шейки корня, см	Высота, м	Диаметр кроны, м	Коэффициенты формы				Старое видовое число
					Q0	Q1	Q2	Q3	
1	27,6	33,5	14,4	2,8	1,133	0,883	0,690	0,348	0,489
2	26,9	31,1	15,4	1,5	1,138	0,841	0,678	0,402	0,473
3	20,8	27,2	16,3	1,4	1,213	0,936	0,645	0,410	0,527
4	21	23,6	16,1	2,3	1,075	0,898	0,706	0,429	0,503
5	19,5	22,6	12,9	2,3	1,141	0,877	0,764	0,420	0,517
6	16,2	18,1	14,4	1,8	1,143	0,805	0,667	0,453	0,464
7	10,1	12,6	11,0	1,4	1,180	0,939	0,692	0,513	0,575
8	22,2	27,1	18,0	2,8	1,137	0,832	0,637	0,403	0,452
9	22,8	29,3	12,8	4,0	1,312	0,877	0,664	0,457	0,519
10	26,2	32,9	15,6	6,3	1,057	0,809	0,614	0,397	0,446
11	16,3	19,6	16,0	1,5	1,158	0,899	0,665	0,466	0,506
12	10,2	13,8	12,1	1,4	1,122	0,877	0,724	0,510	0,541
13	24,7	29	15,4	3,2	1,197	0,874	0,662	0,413	0,485
14	22	25,3	13,7	2,7	1,134	0,821	0,673	0,411	0,461
15	19,8	24,5	14,6	2,8	1,173	0,900	0,668	0,364	0,498
16	27,4	35,3	15,1	4,0	1,240	0,924	0,717	0,421	0,532
17	26,5	32,8	15,1	3,5	1,131	0,827	0,619	0,357	0,437
18	19,4	23,1	15,7	2,4	1,178	0,854	0,658	0,292	0,437
19	20,4	24,8	14,9	3,0	1,352	0,877	0,659	0,424	0,513
20	21,3	27	13,6	2,4	1,392	0,876	0,661	0,438	0,527
21	15,1	18,5	12,0	2,7	1,338	0,868	0,712	0,434	0,551
22	8,7	10,8	11,1	1,8	1,245	0,891	0,676	0,411	0,521
23	15,1	19,7	13,4	1,3	1,138	0,919	0,692	0,488	0,538
24	17,5	21,7	13,6	1,6	1,204	0,861	0,740	0,469	0,522
25	11,2	13,2	10,4	1,3	1,210	0,890	0,653	0,384	0,505
26	21,4	29,5	13,2	2,7	1,236	0,826	0,657	0,425	0,486
27	20,8	26,3	14,0	3,1	1,227	0,821	0,660	0,389	0,462
28	13,8	17	12,5	2,7	1,143	0,819	0,619	0,333	0,448
29	13,9	16,7	12,2	1,5	1,256	0,917	0,745	0,499	0,572

№ п/п	Таксационный диаметр, см	Диаметр у шейки корня, см	Высота, м	Диаметр кроны, м	Коэффициенты формы				Старое видовое число
					Q0	Q1	Q2	Q3	
30	9,5	11,8	10,2	1,4	1,272	0,887	0,749	0,524	0,584
31	12,6	16,8	12,6	1,5	1,236	0,863	0,693	0,444	0,507
32	9,8	10,5	10,9	1,1	1,176	0,936	0,763	0,420	0,557
33	22	27,5	15,3	2,7	1,260	0,855	0,699	0,431	0,509
34	16,8	19,8	14,8	1,6	1,100	0,890	0,697	0,512	0,534
35	20,4	25,3	14,5	2,9	1,243	0,901	0,729	0,502	0,556
36	17,3	20	15,6	1,9	1,130	0,847	0,648	0,457	0,482
37	25,3	27,2	15,4	3,4	1,098	0,810	0,654	0,433	0,465
38	23,6	27,9	14,5	3,1	1,149	0,906	0,762	0,521	0,567
39	23	29,3	16,3	3,0	1,174	0,888	0,668	0,472	0,504
40	29,2	36,5	16,3	5,1	1,247	0,909	0,685	0,431	0,533
41	25	29	16,8	2,8	1,081	0,847	0,604	0,386	0,450
42	11,2	13,3	12,2	1,3	1,194	0,900	0,734	0,500	0,551
43	8	10,2	11,3	1,0	1,256	0,904	0,665	0,442	0,537
44	18,8	22,7	14,7	2,0	1,094	0,898	0,794	0,490	0,559
45	16,7	21,6	14,6	1,9	1,176	0,884	0,699	0,498	0,524
46	16,2	20,5	13,2	1,5	1,236	0,891	0,700	0,428	0,539
47	13,7	15,9	13,4	1,4	1,169	0,865	0,676	0,438	0,505
48	16,6	20,1	14,5	2,0	1,176	0,853	0,679	0,444	0,494
49	8,5	10,2	11,3	1,0	1,149	0,821	0,615	0,448	0,472
50	7,9	9,2	10,0	1,1	1,217	0,828	0,627	0,430	0,476
51	10	13,1	11,2	1,4	1,181	0,935	0,776	0,555	0,591
52	5,4	5,9	7,6	1,3	1,080	0,921	0,790	0,529	0,592
53	21,3	26,5	14,5	2,0	1,226	0,892	0,725	0,381	0,505
54	19,8	24,5	14,9	1,9	1,254	0,867	0,640	0,411	0,494
55	21,4	25,2	14,9	1,8	1,188	0,843	0,622	0,313	0,441
56	20,5	26,2	16,0	1,9	1,167	0,909	0,758	0,445	0,542
57	23,6	29,4	16,2	0,0	1,260	0,897	0,738	0,442	0,532
58	30,5	37	16,2	3,1	1,211	0,812	0,594	0,295	0,418
59	17,2	21,8	14,7	1,5	1,255	0,933	0,711	0,481	0,554
60	28,7	33,7	16,7	2,9	1,158	0,824	0,668	0,397	0,461

Результаты и их обсуждение

В результате исследования получены лесоводственно-таксационные характеристики древостоев и модельных деревьев. Выявление взаимосвязи диаметра крон деревьев с различными таксационными показателями является актуальной задачей [2]. Для выявления зависимости между диаметром, высотой и диаметром крон на основе данных таблицы 2 выполнен множественный регрессионный анализ. Полученное уравнение позволит усовершенствовать дистанционный способ таксации лесов (1):

$$D_{1,3} = -14{,}15 + 1{,}97 \times H + 2{,}3 \times D_k \quad (1)$$

где $D_{1,3}$ – диаметр на высоте груди, см;

H – высота дерева, м;

D_k – диаметр кроны дерева, м;

F – критерий Фишера, $F(2,57) = 115{,}77$;

R^2 – коэффициент детерминации, характеризующий тесноту связи уравнения, $R^2 = 0{,}80$;

Стандартная ошибка свободного члена регрессионного уравнения = 2,8. Оба коэффициента регрессии статистически значимо отличаются от 0 ($P < 0{,}001$).

Статистическая обработка показала, что между диметром, шириной кроны и высотой дерева имеется достоверная и тесная связь.

Зависимости между полнотой древостоя и сомкнутостью крон сосны

Для нахождения коэффициентов уравнения связи между полнотой древостоя и сомкнутостью полога был выполнен регрессионный анализ на основе данных таблицы 1. Полученная зависимость между относительной полнотой исследуемых древостоев и дешифровочной сомкнутостью характеризуется уравнением (2):

$$P = -0{,}74 + 2{,}89 \times S_{РД} \quad (2)$$

где $S_{РД}$ – дешифровочная сомкнутость полога;

P – относительная полнота древостоя.

$R^2 = 0{,}30$;

$F(1,8) = 4{,}86$.

В результате анализа зависимости между относительной полнотой древостоя и сомкнутостью крон выявлена слабая связь.

Зависимости между видовой высотой и высотой дерева

Для визуализации зависимости видовой высоты от высоты деревьев построена диаграмма размаха. Как видно из рисунка 2, значения видовой высоты отклоняются от среднего значения. Отклонения от общей прямолинейной зависимости видовой высоты от высоты ствола в наибольшей степени наблюдаются для средних высот 10 и 16 м.

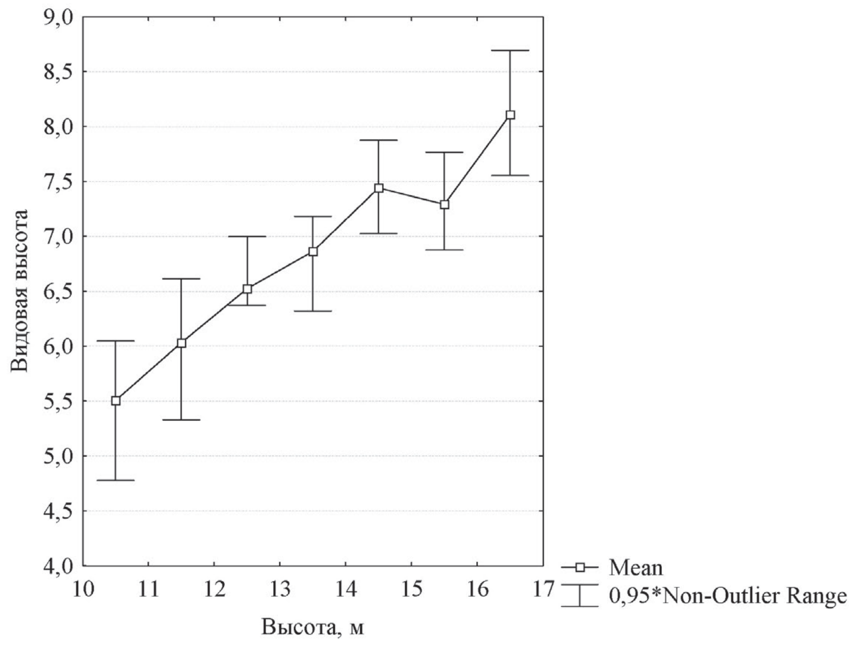

Рис. 2. Зависимость видовой высоты от высоты деревьев

Для нахождения коэффициентов уравнения связи между видовой высотой и высотой стволов был выполнен регрессионный анализ на основе данных таблицы 2. В результате получены коэффициенты прямолинейной зависимости, выраженной уравнением (3):

$$fH = 0{,}38 \times H + 1{,}72 \quad (3)$$

где fH – видовая высота;

f – старое видовое число;

H – Высота ствола, м;

R^2 – коэффициент детерминации, характеризующий тесноту связи уравнения, $R^2 = 0{,}8$.

Для сравнения с имеющимися значениями видовых высот в зависимости от высоты приведены данные из справочной литературы по Северо-Западному [5] и Северо-Восточному лесотаксационному району для притундрового подрайона [4]. Как видно из рисунка 3, полученное авторами уравнение не отличается от значений, приведенных в нормативно-справочной литературе.

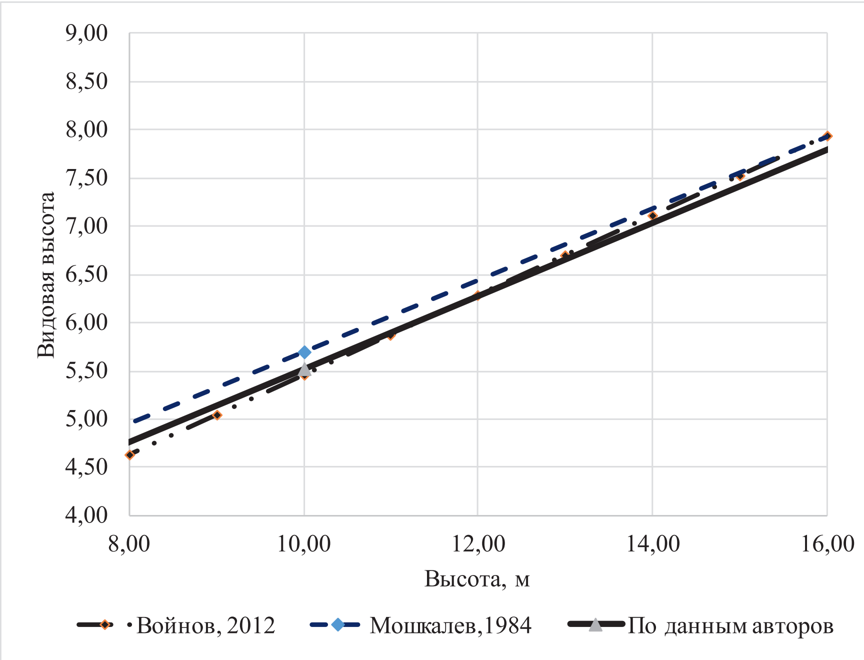

Рис. 3. Зависимость средних видовых высот (fH) от высоты для сосновых древостоев

Норма выработки рубки, обмера и разделки модельных (учетных) деревьев на пробных площадях в составе бригады из инженера, мерщика III разряда и двух мерщиков II разряда для сосны диметром 12–20 см составляет 17 штук в день [6]. Применение фотограмметрического метода позволяет значительно увеличить количество моделей. Для условий притундровых лесов Мурманской области данная технология положительно зарекомендовала себя, однако при заданных параметрах съемки допустимы измерения стволов деревьев не выше 17 метров, что ограничивает зону ее применения лесами сухопутной территории Арктики.

Зависимость диаметра на высоте 1,3 м от диаметра у шейки корня

Для нахождения коэффициентов уравнения связи между диаметром на высоте 1,3 м от диаметра у шейки корня был выполнен регрессионный анализ данных таблицы 2. В результате получены коэффициенты линейного уравнения (4):

$$D_{1,3} = 0{,}81 * D_0 + 0{,}29 \quad (4)$$

где $D_{1,3}$ – таксационный диаметр, см;

D_0 – диаметр у шейки корня, см;

R^2 – коэффициент детерминации, характеризующий тесноту связи уравнения, R^2 = 0,98.

Заключение

Полученные закономерные связи могут быть использованы для определения запаса древесины в чистых сосновых древостоев в брусничном и лишайниковом типах леса IV и V классов бонитета. Полученное уравнение связи между видовой высотой и высотой деревьев у изучаемых насаждений повысит точность таксации. Полученные данные подтверждают наличие прямолинейной связи между указанными параметрами. Применение видовой высоты для определения запаса отельного дерева может повлечь за собой ошибку, вызванную разбросом значений для различных высот.

Выявлена достоверная связь между диаметром крон, высотой ствола и диаметром дерева сосны в изучаемых древостоях.

Публикация подготовлена по результатам НИР, выполненных в рамках государственного задания ФБУ «СевНИИЛХ» на проведение прикладных научных исследований в сфере деятельности Федерального агентства лесного хозяйства (регистрационный номер темы: 122020300230–5; 123022800118–4).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Артемьев, О.С. Методика измерения высот деревьев по материалам цифровой наземной фотосъемки / О.С. Артемьев, А.А. Вайс, Е.А. Найденко // Вестник КрасГАУ. – 2013. – № 8. – С. 122–125 – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/metodika-izmereniya-vysot-dereviev-po-materialam-tsifrovoy-nazemnoy-fotosemki (дата обращения: 11.01.2024).
2. Богданов, А.П. Выявление взаимосвязи диаметра крон деревьев с различными таксационными показателями в северо-таежном лесном районе / А.П. Богданов, Р.А. Алешко, А.С. Ильинцев // Вопросы лесной науки. – 2019. – Т. 2 (4). – С. 1–10. – DOI: 10.31 509/2658-607x-2019-2-4-1-10.
3. Зиганшин, Р.А. Площадь выявления насаждений и необходимое число наблюдений в древостоях элементов леса / Р.А. Зиганшин // Лесоведение. – 2017. – № 6. – С. 464–477. – DOI: 10.7868/S0024114817060109.
4. Лесотаксационный справочник по северо-востоку европейской части Российской Федерации: (нормативные материалы для Ненецкого автономного округа, Архангельской, Вологодской областей и Республики Коми) / Федер. агентство лесного хоз-ва, Федер. бюджет. учреждение «Сев. науч.-исслед. ин-т лесного хоз-ва»; [сост.: канд. с.-х. наук Войнов Г.С. и др.]. – Архангельск : ОАО ИПП «Правда Севера». – 2012. – 672 с/
5. Лесотаксационный справочник по Северо-Западу СССР. Сост: Мошкалев А.Г., Давидов Г.М., Яновский Л.Н., Моисеев В.С., Столяров Д.П., Бурневский Ю.Н. – Л. : ЛТА. – 1984. – 320 с.
6. Нормы выработки для инженерно-технических работников и рабочих на лесоустроительные работы. Ч. 1. Полевые работы. М. : Леспроект, 1973. – 41 с.
7. Третьяков, С.В. Лесная таксация. Часть 1. Таксация древесного ствола и лесной продукции : учебное пособие / С.В. Третьяков, С.В. Коптев, А.А. Бахтин, А.С. Ильинцев ; Сев. (Арктич.) федер. ун-т им. М.В. Ломоносова. – Архангельск : САФУ, 2019. – 149 с. – ISBN 978-5-261-01435-5.
8. Третьяков, С.В. Лесная таксация. Часть 4. Закладка и таксация и описание пробных площадей при проведении научных исследований и подготовке выпускных квалификационных работ : учебное пособие / С.В. Третьяков, С.В. Коптев, Е.Н. Наквасина [и др.] / Сев. (Арктич.) федер. ун-т им. М.В. Ломоносова. – Архангельск : САФУ, 2023. – 119 с. – ISBN 978-5-261-01654-0.
9. Berveglieri, A. Photogrammetric measurement of tree stems from vertical fisheye images / A. Berveglieri, A. Tommaselli, X. Liang, E. Honkavaara // Scandinavian Journal of Forest Research. – 2017. – № 32 (8). – P. 737–747. – DOI: 10.1080/02827581.2016.1273381.
10. Brownlie, R. Image-based dendrometry system for standing trees / R. Brownlie, W. Carson, J. Firth, C. Goulding // Environmental Science, Engineering. – 2007. – № 2880. – P. 153–168.
11. Clark, N. An assessment of the utility of a non-metric digital camera for measuring standing trees / N. Clark, R. Wynne, D. Schmoldt, M. Winn // Computers and Electronics in Agriculture. – 2000. – № 28 (2). – P. 151–169. – DOI: 10.1016/s0168-1699(00)00125-3.
12. Costa, C. Digital stereovision system for dendrometry, georeferencing and data management / C. Costa, S. Figorilli, A. Proto, G. Colle, G. Sperandio, P. Gallo, F. Antonucci, F. Pallottino, P. Menesatti // Biosystems Engineering. – 2018. – № 174. – P. 126–133. – DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2018.07.003.
13. Hapca, A. A digital photographic method for 3D reconstruction of standing tree shape / A. Hapca, F. Mothe, J. Leban // Annals of Forest Science. – 2007. – № 64. – P. 631–637. – DOI: 10.1051/forest:2007041.
14. Miller, J. 3D modelling of individual trees using a handheld camera: Accuracy of height, diameter and volume estimates / J. Miller, J. Morgenroth, C. Gomez // Urban Forestry & Urban Greening. – 2015. – № 14 (4). – P. 932 – 940. – DOI: 10.1016/j.ufug.2015.09.001.

15. Shimizu, A. Diameter Measurements of the Upper Parts of Trees Using an Ultra-Telephoto Digital Photography System / A. Shimizu, S. Yamada, Y. Arita // Open Journal of Forestry. – 2014. – Vol. 4. – № 4. – P. 316–326. – DOI: 10.4236/ojf.2014.44038.

REFERENCES

1. Artem'ev O.S., Vais A.A., Naidenko E.A. Metodika izmereniya vysot derev'ev po materialam tsifrovoi nazemnoi fotos"emki [Methodology for measuring tree heights using digital terrestrial photography materials]. *Vestnik KrasGAU [Bulletin of KrasGAU]*, 2013, no. 8, pp. 122–125. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/metodika-izmereniya-vysot-dereviev-po-materialam-tsifrovoy-nazemnoy-fotosemki (date of the application: 11.01.2024). (In Russian).
2. Bogdanov A.P., Aleshko R.A., Il'intsev A.S. Vyyavlenie vzaimosvyazi diametra kron derev'ev s razlichnymi taksatsionnymi pokazatelyami v severo-taezhnom lesnom raione [Identification of the relationship between the diameter of tree crowns and various taxation indicators in the northern taiga forest region]. *Voprosy lesnoi nauki [Forest Science Issues]*, 2019, vol. 2 (4), pp. 1–10. DOI 10.31 509/2658-607x-2019-2-4-1-10. (In Russian).
3. Ziganshin R.A. Ploshchad' vyyavleniya nasazhdenii i neobkhodimoe chislo nablyudenii v drevostoyakh elementov lesa [Area of identification of plantings and the required number of observations in forest stands of forest elements]. *Lesovedenie [Forestry]*, 2017, no. 6, pp. 464-477. DOI: 10.7868/S0024114817060109. (In Russian).
4. Lesotaksatsionnyi spravochnik po severo-vostoku evropeiskoi chasti Rossiiskoi Federatsii: (normativnye materialy dlya Nenetskogo avtonomnogo okruga, Arkhangel'skoi, Vologodskoi oblastei i Respubliki Komi) [Forest taxation reference book for the northeast of the European part of the Russian Federation: (regulatory materials for the Nenets Autonomous Okrug, Arkhangelsk, Vologda regions and the Komi Republic). Feder. Forestry Agency, Feder. budget. institution "Northern scientific research Institute of Forestry"; [comp.: Ph.D. agricultural Sciences Voinov G.S. and etc.]. Arkhangelsk, OJSC IPP “Pravda Severa”.]. 2012, 672 p. (In Russian).
5. Lesotaksatsionnyi spravochnik po Severo-Zapadu SSSR [Forest taxation guide for the North-West of the USSR]. Sost: Moshkalev A.G., Davidov G.M., Yanovskii L.N., Moiseev V.S., Stolyarov D.P., Burnevskii Yu.N. Leningrad, LTA, 1984, 320 p. (In Russian).
6. Normy vyrabotki dlya inzhenerno-tekhnicheskikh rabotnikov i rabochikh na lesoustroitel'nye raboty [Output standards for engineering and technical workers and forestry workers. Part 1. Field work]. Moskow, Lesproekt, 1973, 41 p. (In Russian).
7. Tretyakov S.V., Koptev S.V., Bakhtin A.A., Il'intsev A.S. Lesnaya taksatsiya. Chast' 1. Taksatsiya drevesnogo stvola i lesnoi produktsii: uchebnoe posobie [Forest taxation. Part 1. Taxation of tree trunks and forest products: textbook]. Arkhangel'sk, SAFU, 2019, 149 p. ISBN 978-5-261-01435-5. (In Russian).
8. Tretyakov S.V., Koptev S.V., Nakvasina E.N., Bakhtin A.A., Il'intsev A.S., Bogdanov A.P. [et al.] Lesnaya taksatsiya. Chast' 4 [Forest taxation. Part 4. Laying and taxation and description of trial plots when conducting scientific research and preparing final qualifying works: a textbook]. Arkhangel'sk, SAFU, 2023, 119 p. ISBN 978-5-261-01654-0. (In Russian).
9. Berveglieri A., Tommaselli A., Liang X., Honkavaara E. Photogrammetric measurement of tree stems from vertical fisheye images. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2017, no. 32 (8), pp. 737–747. DOI: 10.1080/02827581.2016.1273381.
10. Brownlie R., Carson W., Firth J., Goulding C. Image-based dendrometry system for standing trees. *Environmental Science, Engineering*, 2007, no. 2880, pp. 153–168.
11. Clark N., Wynne R., Schmoldt D., Winn M. An assessment of the utility of a non-metric digital camera for measuring standing trees. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2000, no. 28. (2), pp. 151–169. DOI: 10.1016/s0168-1699(00)00125-3.
12. Costa C., Figorilli S., Proto A., Colle G., Sperandio G., Gallo P., Antonucci F., Pallottino F., Menesatti P. Digital stereovision system for dendrometry, georeferencing and data management. *Biosystems Engineering*, 2018, no. 174, pp. 126–133. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2018.07.003.
13. Hapca A., Mothe F., Leban J. A digital photographic method for 3D reconstruction of standing tree shape. *Annals of Forest Science*, 2007, no. 64, pp. 631–637. DOI: 10.1051/forest:2007041.
14. Miller J., Morgenroth J., Gomez C. 3D modelling of individual trees using a handheld camera: Accuracy of height, diameter and volume estimates. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2015, no. 14 (4), pp. 932–940. DOI: 10.1016/j.ufug.2015.09.001.
15. Shimizu A., Yamada S., Arita Y. Diameter Measurements of the Upper Parts of Trees Using an Ultra-Telephoto Digital Photography System. *Open Journal of Forestry*, 2014, no. 4, pp. 316–326. DOI: 10.4236/ojf.2014.44038.

Статья поступила в редакцию 19.01.2024