



ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ И ПРОДУКТИВНОСТИ ВЫСОКОПОЛНОТНЫХ СОСНОВЫХ НАСАЖДЕНИЙ ПОДТАЕЖНО-ЛЕСОСТЕПНОГО РАЙОНА СРЕДНЕЙ СИБИРИ)

Андрей А. Вайс¹, vais6365@mail.ru, 0000-0003-4965-3670

Павел В. Михайлов¹, mihaylov.p.v@mail.ru, 0000-0003-3967-0709

Александра И. Мельник¹, aleksandrana2013@gmail.com, 0000-0002-1673-1639

Светлана А. Чанчикова¹, svetylei4ka@mail.ru, 0000-0001-6283-1406

Ольга А. Герасимова¹✉, goa.1903@yandex.ru, 0000-0001-6498-5986

Евгений А. Ануев¹, djekizion@mail.ru, 0000-0002-1822-0795

Артем Г. Неповинных¹, artixz@yandex.ru, 0000-0001-9513-9950

¹ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени акад. М.Ф. Решетнева», просп. им. газеты «Красноярский рабочий», 31, г. Красноярск, 660037, Россия

Лесные экосистемы, в частности сосновые насаждения, испытывают в настоящее время комплекс негативных факторов, которые влияют как на состояние насаждений, так и на их приростные показатели. Целью исследования являлось определение состояния и продуктивности пригородных сосняков г. Красноярска, а также статистическо-регрессионная оценка концентрации углерода в растущей, усыхающей и сухостойной части древостоев. Объект исследований – сосновые насаждения естественного происхождения Караульного участкового лесничества Учебно-опытного лесхоза СибГУ им. М.Ф. Решетнева, расположенные в пригородной зоне г. Красноярска. Оценка санитарной категории сосняков позволила констатировать преимущественно «ослабленное» их состояние. Регрессионный анализ позволил констатировать достоверную однокоэффициентную линейную связь углерода различных частей сосняков с запасом стволовой древесины и полнотой насаждений. При этом при прогнозировании углерода сухостойной части древостоя его необходимо делить на две части: обусловленную внешним воздействием (лесные пожары, стадия перестойности, фитопатологические условия) более 20 тС*га⁻¹ и вызванную естественным отпадом до 20 тС*га⁻¹. В результате установлено, что в высокополнотных, густых сосняках подтаежно-лесостепного района Средней Сибири устойчивость сосняков обусловлена комплексом факторов: возрастной структурой (при прекращении активной фазы роста у насаждений снижаются показатели жизненного состояния); полнотой (высокая густота ухудшает состояние деревьев); запасом (рост количества стволовой древесины на единице площади способствует увеличению усыхающей части соснового древостоя); климатическими условиями (возрастание температуры в вегетационный период и снижение количества осадков).

Ключевые слова: сосна, состояние, высокая полнота, запас, углерод, климат

Благодарности: Исследование проводилось в рамках государственного задания, установленного Министерством науки и высшего образования Российской Федерации, для реализации проекта «Оценка устойчивости лесных экосистем к изменению климата как основа мониторинга углеродного бюджета» (FEFE–2021–0018) коллективом научной лаборатории «Лесных экосистем».

Авторы благодарят рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи.

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Оценка состояния и продуктивности высокополнотных сосновых насаждений подтаежно-лесостепного района Средней Сибири / А. А. Вайс, П. В. Михайлов, А. И. Мельник, С.А. Чанчикова, О. А. Герасимова, Е. А. Ануев, А. Г. Неповинных // Лесотехнический журнал. – 2022. – Т. 12. – № 3 (47). – С. 26–41. – Библиогр.: с. 37–39 (15 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.3/3>.

Поступила: 27.05.2022 *Принята к публикации:* 20.09.2022 *Опубликована онлайн:* 01.10.2022

ASSESSMENT OF THE CONDITION AND PRODUCTIVITY OF HIGH PINE PLANTATIONS IN THE SUBTAIGA FOREST-STEPPE REGION OF CENTRAL SIBERIA

Andrey A. Vais¹, vais6365@mail.ru,  0000-0003-4965-3670

Pavel V. Mikhailov¹, mihaylov.p.v@mail.ru,  0000-0003-3967-0709

Alexandra I. Melnik¹, aleksandrana2013@gmail.com,  0000-0002-1673-1639

Svetlana A. Chanchikova¹, svetylei4ka@mail.ru,  0000-0001-6283-1406

Olga A. Gerasimova¹✉, goa.1903@yandex.ru,  0000-0001-6498-5986

Evgenij A. Anuev¹, djekizion@mail.ru,  0000-0002-1822-0795

Artem G. Nepovinykh¹, artixz@yandex.ru,  0000-0001-9513-9950

¹Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarskii rabochii prospect, 31, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

Abstract

Forest ecosystems, in particular pine plantations, are currently experiencing a complex of negative factors that affect both the condition of plantations and their growth indicators. The purpose of the study was to determine the condition and productivity of suburban pine forests of Krasnoyarsk, as well as statistical regression assessment of carbon concentration in the growing, dying and dried part of the forest stands. The object of research is pine forests of natural origin of Karaulnoe area forestry of experimental forestry of M.F. Reshetnev Siberian State University, located in the suburban area of Krasnoyarsk. Evaluation of sanitary category of pine forests allowed to state mainly "weakened" their condition. Regression analysis ascertained a reliable one-coefficient linear relationship between the carbon of different parts of pine forests and the supply of trunk wood and the completeness of forest stands. In this case, when predicting the carbon of the deadwood part of the stand, it must be divided into two parts: caused by external influences (forest fires, the stage of obsolescence, phyto-pathological conditions) more than 20 tS*ha⁻¹ and caused by natural fall-off to 20 tS*ha⁻¹. As a result, it was found that in high-density, dense pine forests of the subtaiga forest-steppe region of Middle Siberia, the stability of pine forests is due to a complex of factors: age structure (when the active phase of growth in plantations is terminated, indicators of vitality decrease); completeness (high density worsens the condition of trees); stock (growth of the number of trunk wood per unit area contributes to an increase in the drying part of the pine stand); climatic conditions (an increase in temperature during the growing season and a decrease in the amount of precipitation).

Keywords: pine, condition, high fullness, stock, carbon, climate

Acknowledgments: The research was carried out within the framework of the state assignment, set out by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation, for the implementation by the Scientific Laboratory of Forest Ecosystems of the project «Assessment of forest ecosystems resilience under climate change as a basis of carbon budget monitoring» (FEFE–2021–0018).

The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest.

For citation: Vais A. A., Mikhailov P. V., Melnik A. I., Chanchikova S. A., Gerasimova O. A., Anuev E. A., Nepovninnykh A. G. (2022) Assessment of the condition and productivity of high pine plantations in the subtaiga forest-steppe region of Central Siberia. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forest Engineering journal], Vol. 12, No. 3 (47), pp. 26–41 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.3/3>.

Received: 27.05.2022 **Revised:** 12.09.2022 **Accepted:** 20.09.2022 **Published online:** 01.10.2022

Введение

В настоящее время наблюдаются процессы снижения устойчивости лесных экосистем. Основными факторами деградации лесных массивов являются аномальные климатические условия, рекреация, техногенное влияние и фитопатологические очаги.

Роль лесов России в уменьшении антропогенной эмиссии парниковых газов составляет около 27 % [1]. Всё это подчёркивает значение состояния массивов для поддержания углерододепонирующей функции. Негативные процессы после 2008 года (увеличение интенсивность рубок и лесных пожаров, снижение поглощения углерода) способствовали снижению стока углерода [2]. Рядом исследователей установлена роль аномальных климатических показателей на формирование и рост ранней и поздней древесины [5, 9, 13]. При этом наблюдаются и адаптационные процессы на изменение климата в лесных экосистемах [4]. Негативное воздействие биотических и абиотических факторов может приводить и к массовой гибели сосновых насаждений, например, в Белорусском Полесье [6]. Авторы отмечают, что на деградацию древостоев повлияло понижение грунтовых вод, увеличение инсоляции в условиях изменения климата.

Ухудшение санитарного состояния лесов вследствие антропогенного (состояние лесосек) и экзогенного (буреломы, ветровалы, гари, фитопатологические и инвазивные очаги) воздействий способствует интенсификации процессов эмиссии углерода [15, 12, 11, 8, 10, 14]. Можно констатировать, что лесные экосистемы, в частности сосновые насаждения, испытывают в настоящее время комплекс негативных факторов, которые влияют как на состояние насаждений, так и на их приростные показатели.

Материалы и методы

Целью исследования являлось определение состояния и продуктивности пригородных сосняков г. Красноярска, а также оценка концентрации углерода в растущей, усыхающей и сухостойной части древостоев.

Объект исследований – сосновые насаждения естественного происхождения Караульного участкового лесничества Учебно-опытного лесхоза СибГУ им. М.Ф. Решетнева, произрастающие в пригородной зоне г. Красноярска (рис. 1).

На территории опытного объекта основной лесобразующей породой является сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.). В насаждениях помимо сосны встречаются такие породы, как берёза повислая (*Betula pendula* Roth) и осина обыкновенная (*Populus tremula* L.). В Приенисейской части опытного объекта произрастают чистые сосновые насаждения.

В качестве учетной единицы использовали круговую площадку постоянного радиуса. Методика закладки и обработки таких площадок подробно представлена в пособии «Наставление по отводу и таксации лесосек в лесах Российской Федерации». Выбор обусловлен тем, что сосняки опытного объекта характеризуются высокой плотностью и полнотой [3]. В каждом выделе (лесном участке) закладывалось по 3 круговые площадки, данные учета которых затем объединялись и представлялись в итоговом виде. Радиус площадки составлял 13,75 м (площадь – 594 м²). Площадки закладывались равномерно по площади (рис. 1). Работы по определению состояния древостоев выполнены на территории 21 лесного участка с общим количеством площадок 63 штуки, в период с 01.07.2021 по 15.10.2021 г.

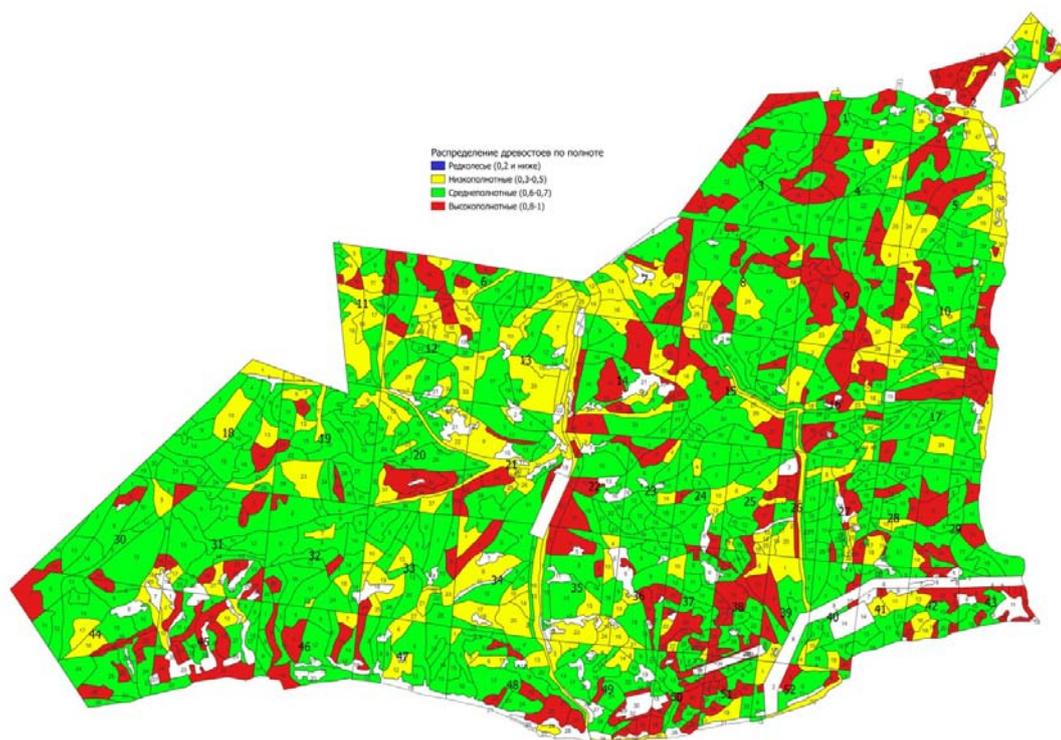


Рис. 1. Структура по полноте насаждений опытного объекта (Караульное участковое лесничество учебно-опытного лесхоза СибГУ им. М.Ф. Решетнева)

Figure 1. Structure by completeness of plantations of the experimental object (Karaulnoe plot forestry of the Reshetnev University educational-experimental forestry)

Источник: собственные фотографии авторов

Source: authors' own photos

Таблица 1

Индексы и категории состояния

Table 1

State indices and categories

Средневзвешенный индекс состояния древостоя Average weighted index of stand condition		Показатель жизненного состояния древостоя Indicator of the vitality of the stand		Общая категория General category
балл score	категория category	%	категория category	
1,00-1,50	без признаков ослабления without signs of weakening	100-80	здоровый healthy	здоровый healthy
1,51-2,50	ослабленный impaired	79-50	поврежденный damaged	поврежденный / ослабленный damaged / weakened
2,51-3,50	сильно ослабленный severely weakened	49-20	сильно поврежденный badly damaged	сильно поврежденный / сильно ослабленный severely damaged / severely weakened
3,51-4,50	усыхающий withered	19-1	полностью разрушенный completely ruined	усыхающий / полностью разрушенный withered / completely ruined
> 4,51	погибший dead	0	погибший dead	погибший / погибший dead / dead

Источник: собственные вычисления авторов

Source: The authors' own calculations

У каждого дерева на площадке измерен диаметр на высоте груди, высота части растущих и сухостойных деревьев, установлена категория состояния (1-5 категории) (табл. 1).

После сбора данных произведена оценка основных таксационных показателей. Для этого использовалась электронная таблица Excel; нормативные таблицы, отражающие рост насаждений в условиях Средней Сибири.

Оценка состояния сосняков выполнялась на круговых площадках в лесных участках, которые являются модельными для данной территории. Всего заложено 63 круговых площадок в 21 лесном выделе. Все работы проводились в соответствии с классическими таксационно-лесоводственными требованиями (см. выше). Для этого у каждого дерева определялась категория жизнеспособности (1 – здоровое, 2 – ослабленное, 3 – сильно ослабленное, 4 – усыхающее, 5 – свежий и старый сухостой, ветровал, бурелом).

Степень ослабления (состояние) насаждения на выделе в целом или каждой древесной породы определялась как средневзвешенная величина оценок по числу деревьев и распределению сумм площадей поперечного сечения стволов деревьев разных категорий состояния. Средневзвешенная величина для каждой породы рассчитывалась по формуле («Правила санитарной безопасности в лесах», 2020)

$$K_{\text{ср.}} = (P_1 \times K_1 + P_2 \times K_2 + P_3 \times K_3 + P_4 \times K_4 + P_5 \times K_5) / 100, \quad (1)$$

где $K_{\text{ср.}}$ – средневзвешенная величина состояния породы;

P_i – доля каждой категории состояния в процентах;
 K_i – индекс категории состояния дерева.

По значению средневзвешенного индекса определяли состояние древостоя в соответствии со следующей шкалой: средний индекс состояния 1,0...1,5 – здоровый древостой, 1,6...2,5 – ослабленный, 2,6...3,5 – сильно ослабленный, 3,6...4,5 – усыхающий, 4,6 и более – сухостой (Правила санитарной безопасности в лесах, 2020).

Оценка жизненного состояния деревьев проводилась по методике В.А. Алексева [7].

Расчет относительного жизненного состояния древостоя выполнялся по формуле

$$L_n = (100n_1 + 70n_2 + 40n_3 + 5n_4) / N, \quad (2)$$

где L_n – относительное жизненное состояние, рассчитанное по количеству деревьев;

n_1 – количество здоровых;

n_2 – ослабленных;

n_3 – сильно ослабленных;

n_4 – отмирающих деревьев на ПП (или 1 га), шт.;

N – общее количество деревьев (включая сухостой) на ПП или 1 га, шт.

При показателе 100-80 % жизненное состояние древостоя оценивалось как «здоровое», при 79-50 % древостой считался поврежденным (ослабленным), при 49-20 % – сильно поврежденным (сильно ослабленным), при 19 % и ниже – полностью разрушенным.

Шкалы определения санитарного состояния при расчетах средневзвешенного индекса состояния и показателя жизненного состояния по В.А. Алексеву схожи, поэтому для проведения сравнительного анализа выполнена гармонизация шкальных категорий.

С целью прогнозирования запаса стволового углерода применялся метод регрессионного анализа. В качестве выходных переменных использовались запасы углерода крупных структурных единиц древостоя (растущая, усыхающая и сухостойная части). Входными переменными являлись два показателя: запас стволовой древесины и полнота насаждения. Входные и выходные переменные носят количественный характер. На предварительном этапе с помощью коэффициента корреляции Пирсона установлено наличие парной корреляционной связи между входными и выходными переменными. Для отражения регрессионной связи использовалась линейная модель. Все коэффициенты уравнений оказались значимыми ($p < 0,05$), а уравнения – достоверными по критерию Фишера ($F_{\text{ф}} > F_{\text{ст}}$). Оценочными параметрами моделей являлись коэффициенты корреляции между опытными и выравненными данными, а также коэффициент детерминации, отражающий относительную долю влияния входной переменной на выходную величину.

Результаты и обсуждение

Основные таксационные показатели сосняков Караульного лесничества представлены в табл. 2.

Исследуемые насаждения являются чистыми сосновыми древостоями. Максимальный возраст 150 лет, минимальный – 100 лет. Средняя высота изменялась от 20,8 м до 25,5 м, средний диаметр варьировал от 24,1 см до 37,3 см. Запас менялся от 232 м³*га⁻¹ до 623 м³*га⁻¹. Максимальная сумма площадей поперечных сечений деревьев 52,95 м²*га⁻¹, минимальная – 21,91 м²*га⁻¹. Высокие значения сумм площадей поперечного сечения и запасов обусловлены как высокой густотой сосновых насаждений опытного объекта, так и площадью

учетных площадок. Полнота варьировала от 0,61 до 1,44 (рис. 1). Все древостои являются высокопродуктивными (класс бонитета I, II). Группа типов леса – сосняки разнотравные: сосняки осочково-разнотравные, сосняки спирейно-осочковые, сосняки прострелово-осочковые.

В табл. 3 представлена оценка состояния насаждений Караульного лесничества.

Так как доля участия деревьев каждой категории, вычисленная через их число, не совсем корректный показатель, более точными в расчетах следует считать данные, полученные с использованием суммы площадей поперечного сечения стволов (показатель, характеризующийся прямой связью с запасом древесины) [7].

Таблица 2

Таксационные показатели и запасы частей модельных сосняков

Table 2

Taxation indicators and reserves of parts of model pine forests

№	Состав Composi- tion	Возраст, лет Age, years	H ср, м	d ср, см	Бони- тет Bonitet	Пол- нота Fullnes s	Запас, м ³ *га ⁻¹ Stock, m ³ * ha ⁻¹			Запас С, тС*га ⁻¹ Stock C, тC*ha ⁻¹		
							р	ус	сух	р	ус	сух
1	10С	130	26,3	32,1	1	1,05	325	136	36	91	38	10
2	10С	130	23,6	28,8	2	1,21	408	56	80	114	16	22
3	10С	130	24,1	27,9	2	1,11	383	81	121	107	23	34
4	10С	130	22,3	24,2	2	0,64	174	58	28	49	16	8
5	10С	130	25,1	35,1	1	1,32	323	210	52	90	59	15
6	10С	130	25,5	34,6	1	1,33	405	184	61	113	51	17
7	10С	130	26,3	35,7	1	1,44	422	201	73	118	56	20
8	10С	130	24,9	33,2	2	1,31	337	194	44	94	54	12
9	10С	120	25,2	33,9	1	1,42	360	210	45	100	59	13
10	10С	130	25,4	34,1	1	1,04	299	120	25	83	33	7
11	10С	140	24	37,3	2	1,28	363	154	32	101	43	9
12	10С	170	24,3	33,6	2	0,98	224	201	27	62	56	8
13	10С	130	23,6	34,6	2	0,99	291	102	34	81	28	9
14	10С	140	24	27,8	2	0,65	198	76	45	55	21	13
15	10С	130	25,6	30,0	1	0,69	206	96	51	57	27	14
16	10С	120	23,7	27,2	1	0,61	165	70	32	46	20	9
17	10С	170	25,3	31,8	2	0,71	192	90	19	54	25	5
18	10С	130	25,2	33,6	1	0,80	253	100	31	71	28	9
19	10С	115	23,4	32,4	1	0,93	195	179	28	54	50	8
20	10С	120	26,7	31,7	1	0,89	229	161	48	64	45	13
21	10С	120	24,5	31,2	2	0,82	240	83	36	67	23	10

Примечание: H_{ср} – средняя высота, м; d_{ср} – средний диаметр, см; р – растущая часть древостоя; ус – усыхающая часть древостоя; сух – сухостой.

Note: H_{ср} – average height, m; d_{ср} – average diameter, cm; р – growing part of the stand; us – drying part of the stand; dry – dead wood.

Источник: собственные вычисления авторов

Source: The authors' own calculations

Assessment of the condition of pine plantations in the Karaulnoe forest area

№	Бонитет Bonitet	Оценка состояния насаждений Assessment of plantation condition							
		средневзвешенный индекс состояния древостоя ¹ weighted average stand condition index ¹		средневзвешенный индекс состояния древостоя ² weighted average stand condition index ²		показатель жизненного состояния древостоя (Алексеев В.А.) ¹ an indicator of the vital state of the stand (Alexeev V.A.) ¹		показатель жизненного состояния древостоя (Алексеев В.А.) ² an indicator of the vital state of the stand (Alexeev V.A.) ²	
		балл score	категория category	балл score	категория category	%	категория category	%	категория category
1	1	2,7	сильно ослабленный severely weakened	2,3	ослабленный weakened	55	поврежденный damaged	65	поврежденный damaged
2	2	2,7	сильно ослабленный severely weakened	2,3	ослабленный weakened	57	поврежденный damaged	65	поврежденный damaged
3	2	2,8	сильно ослабленный severely weakened	2,5	сильно ослабленный severely weakened	52	поврежденный damaged	52	поврежденный damaged
4	2	3,0	сильно ослабленный severely weakened	2,4	ослабленный weakened	46	сильно поврежденный heavily damaged	59	поврежденный damaged
5	1	2,8	сильно ослабленный severely weakened	2,4	ослабленный weakened	51	поврежденный damaged	60	поврежденный damaged
6	1	2,9	сильно ослабленный severely weakened	2,3	ослабленный weakened	52	поврежденный damaged	64	поврежденный damaged
7	1	2,9	сильно ослабленный severely weakened	2,4	ослабленный weakened	52	поврежденный damaged	61	поврежденный damaged
8	2	2,8	сильно ослабленный severely weakened	2,4	ослабленный weakened	53	поврежденный damaged	61	поврежденный damaged
9	1	2,7	сильно ослабленный severely weakened	2,4	ослабленный weakened	55	поврежденный damaged	61	поврежденный damaged
10	1	2,8	сильно ослабленный severely weakened	2,2	ослабленный weakened	52	поврежденный damaged	66	поврежденный damaged
11	2	2,8	сильно ослабленный severely weakened	2,3	ослабленный weakened	53	поврежденный damaged	63	поврежденный damaged
12	2	3,2	сильно ослабленный severely weakened	2,7	сильно ослабленный severely weakened	42	сильно поврежденный heavily damaged	49	сильно поврежденный heavily damaged
13	2	2,9	сильно ослабленный severely weakened	2,4	ослабленный weakened	51	поврежденный damaged	61	поврежденный damaged
14	2	2,8	сильно ослабленный severely weakened	2,4	ослабленный weakened	53	поврежденный damaged	61	поврежденный damaged
15	1	3,0	сильно ослабленный severely weakened	2,6	сильно ослабленный severely weakened	49	сильно поврежденный heavily damaged	57	поврежденный damaged
16	1	2,7	сильно ослабленный severely weakened	2,53	сильно ослабленный severely weakened	55	поврежденный damaged	57	поврежденный damaged
17	2	2,6	сильно ослабленный severely weakened	2,2	ослабленный weakened	56	поврежденный damaged	66	поврежденный damaged

18	1	2,8	сильно ослабленный severely weakened	2,2	ослабленный weakened	54	поврежденный damaged	65	поврежденный damaged
19	1	3,0	сильно ослабленный severely weakened	2,7	сильно ослабленный severely weakened	44	сильно поврежденный heavily damaged	51	поврежденный damaged
20	1	2,7	сильно ослабленный severely weakened	2,5	ослабленный weakened	55	поврежденный damaged	58	поврежденный damaged
21	2	2,7	сильно ослабленный severely weakened	2,4	ослабленный weakened	55	поврежденный damaged	62	поврежденный damaged

Примечание: ¹доля участия деревьев каждой категории состояния в древостое; ²доля суммы площадей поперечного сечения стволов на высоте 1,3 м каждой категории состояния.

Note: ¹share of participation of trees of each condition category in the stand; ²share of the sum of the areas of the cross section of the trunks at a height of 1.3 m of each condition category.

Источник: собственные вычисления авторов

Source: The authors' own calculations

Для наглядного сравнения результаты анализа представлены на рис. 2.

По данным И.Н. Павлова и др. (2010), в изучаемых сосняках, особенно растущих на старопахотных землях, установлена гибель сосняков от корневой губки. При этом причиной снижения устойчивости сосняков являлось снижение количества осадков в течение ряда лет при одновременном росте температуры приземного слоя воздуха. Другой точки зрения придерживаются Т.Н. Новикова, Д.И. Назимова (2007), которые отмечают, что в условиях Красноярской лесостепи сосновые древостои достаточно устойчивы в условиях умеренного увлажнения к различным воздействиям, при этом они очень хорошо восстанавливаются без смены пород или кратковременной сменой лиственными породами. На наш взгляд, устойчивость сосняков в подтаежно-лесостепном районе Средней Сибири обусловлена комплексом факторов.

По данным А.А. Плужникова (2014), в сосновых насаждениях Центральной лесостепи Воронежской области установлено наличие корреляционной связи между полнотой, бонитетом, категорией санитарного состояния и объемом выполнения насаждениями средообразующих функций, в том числе углеродо-депонирующих задач.

На рис. 3 представлено процентное соотношение растущей, усыхающей и сухостойной частей в общем запасе сосняков. Растущая часть составляет от 48,5 до 75,0 %. Усыхающая часть значительна

и варьирует от 10,3 до 44,5 %. Сухостойная часть менялась по участкам от 5,6 до 20,7 %.

Расчет углерода производился методом объёмно-конверсионных коэффициентов. Установлено, что в растущей части сосняков депонировано от 46 до 118 тС*га⁻¹. В усыхающей части древостоев сосредоточено от 16 до 59 тС*га⁻¹. Эмиссионный запас менялся от 5 до 34 тС*га⁻¹.

Корреляционный анализ позволил выявить значимые связи ($p < 0,05$) (программа «STATGRAPHICS») между запасом растущей части и средней высотой ($r = 0,34$); запасом усыхающей части и средней высотой ($r = 0,42$); запасом растущей части и средним диаметром ($r = 0,44$); запасом усыхающей части и средним диаметром ($r = 0,57$); запасом растущей части и запасом стволовой древесины ($r = 0,87$); запасом усыхающей части и запасом стволовой древесины ($r = 0,59$); запасом сухостойной части и запасом стволовой древесины ($r = 0,52$); запасом растущей части и полнотой древостоя ($r = 0,84$); запасом усыхающей части и полнотой древостоя ($r = 0,62$); запасом сухостойной части и полнотой древостоя ($r = 0,35$); запасом растущей и сухостойной частью древостоя ($r = 0,46$).

Для регрессионного анализа выбраны в качестве независимых переменных запас стволовой древесины и полнота. Все связи оказались прямыми по виду и линейными по форме (рис. 4).

Оценка параметров уравнений представлена в табл. 4.

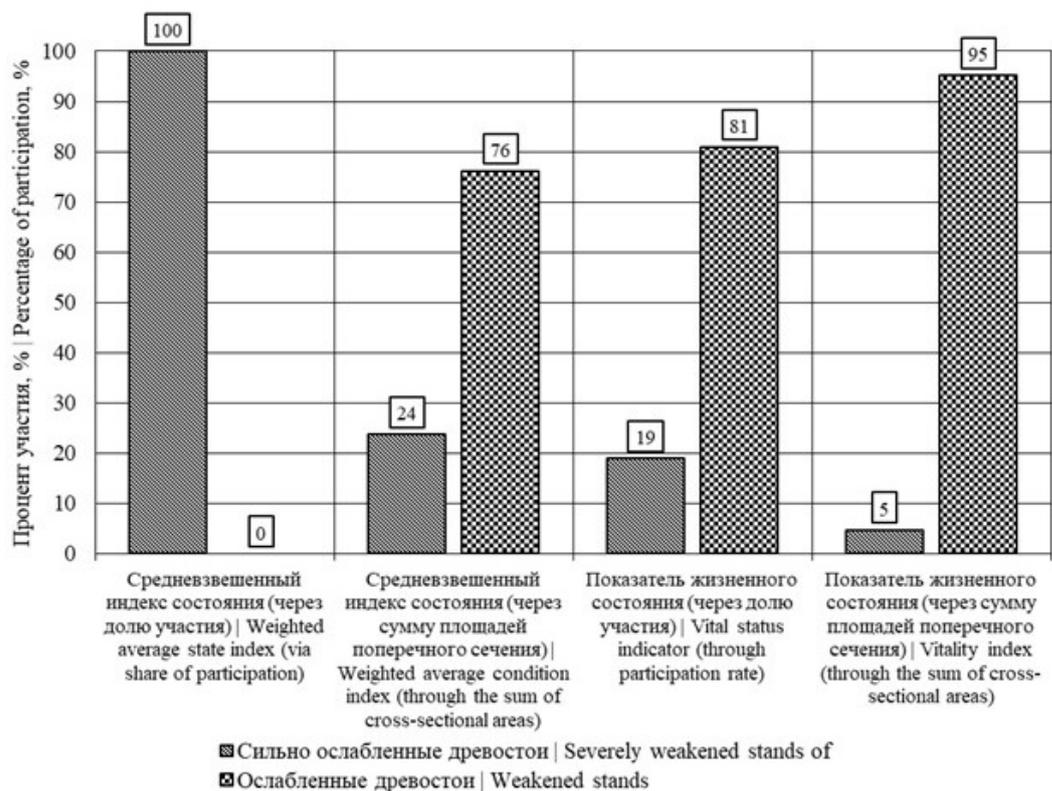


Рис. 2. Процентное соотношение категорий состояния древостоев по разным методам оценки
 Figure 2. Percentage ratio of stand condition categories by different assessment methods

Источник: собственные вычисления авторов
 Source: The authors' own calculations

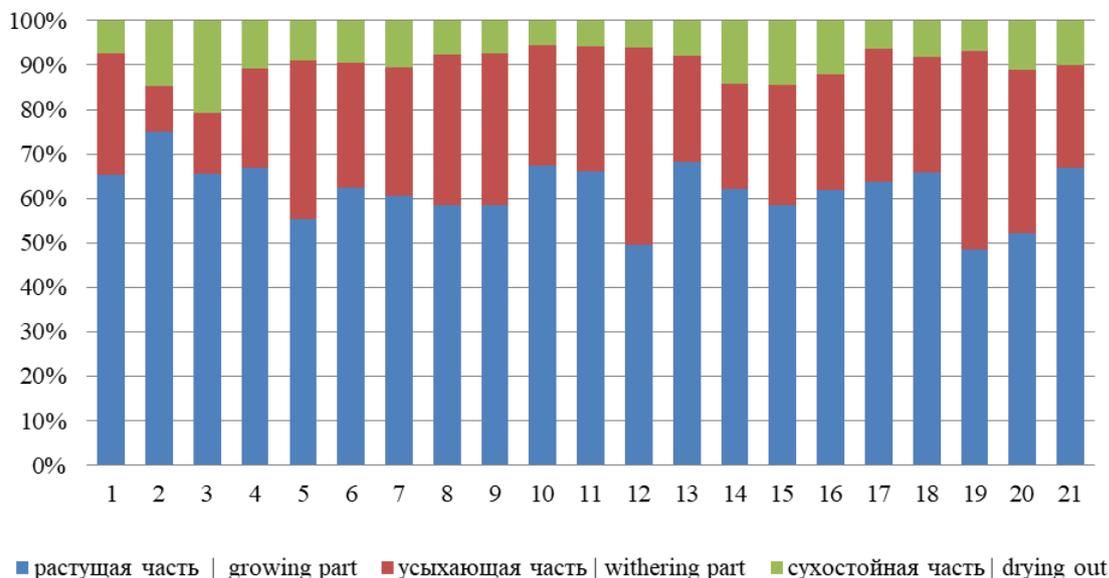
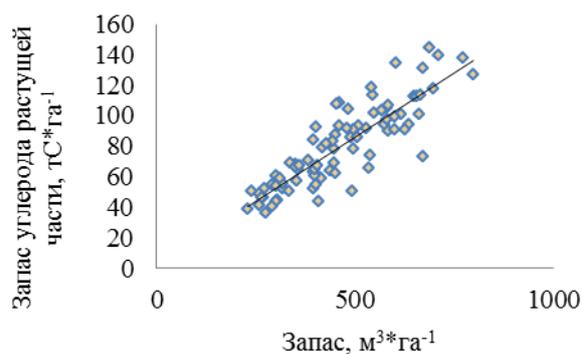
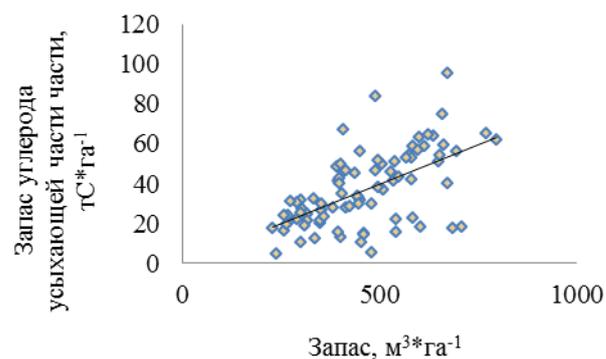


Рис. 3. Процентная структура категориальных частей сосновых древостоев
 Figure 3. Percentage structure of categorical parts of pine stands

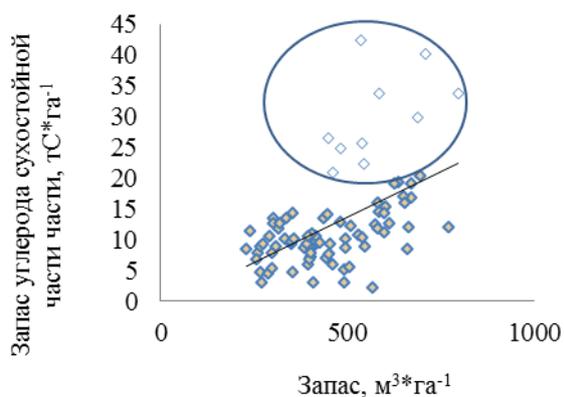
Источник: собственные вычисления авторов
 Source: The authors' own calculations



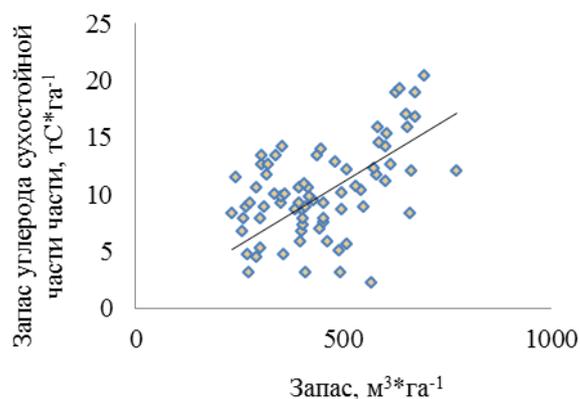
а) Связь запаса углерода растущей части с древесным запасом



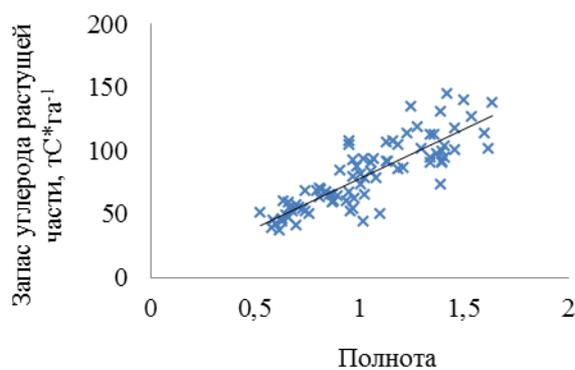
б) Связь запаса углерода усыхающей части с древесным запасом



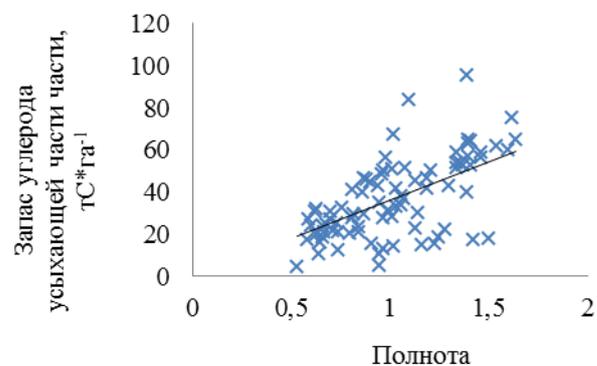
в) Связь запаса углерода сухостойной части, включая очаговый запас, с древесным запасом



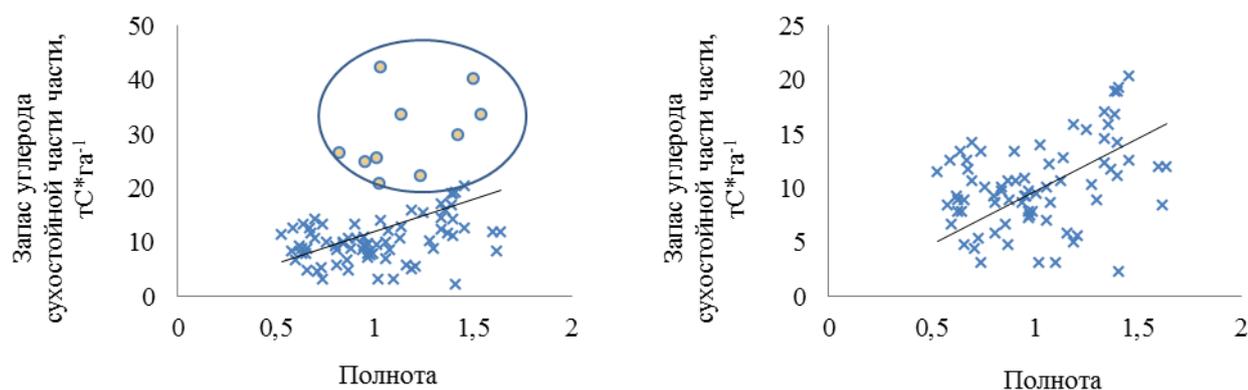
г) Связь запаса углерода усыхающей части, исключая очаговый запас, с древесным запасом



д) Связь запаса углерода растущей части с полнотой



е) Связь запаса углерода усыхающей части с полнотой



ж) Связь запаса углерода сухостойной части, включая очаговый запас, с полнотой з) Связь запаса углерода усыхающей части, исключая очаговый запас, с полнотой

Рис. 4. Регрессионное соотношение запаса стволового углерода различных частей древостоя от запаса древесины и относительной полноты

Figure 4. Regression relationship of the stem carbon stock of different parts of the stand to the stock of wood and relative completeness

Источник: собственные вычисления авторов

Source: The authors' own calculations

Таблица 4

Регрессионные связи и их параметры для оценки депонентов стволового углерода (растущая, усыхающая и сухостойная часть) сосновых насаждений

Table 4

Regression relationships and their parameters for estimation of trunk carbon (growing, drying, and dying parts) of pine plantations

Регрессионная связь Regression relationship	Уравнение Equation	Коэффициент корреляции между опытными и выравненными данными Correlation coefficient between experimental and equated data	Коэффициент детерминации Coefficient of determination	Диапазон действия регрессии Regression range
$M_{cp} = f(M)$	$M_{cp} = 0,172 * M$	0,87	0,75	231-771 $m^3 * \text{га}^{-1}$ 231-771 $m^3 * \text{ha}^{-1}$
$M_{cy} = f(M)$	$M_{cy} = 0,080 * M$	0,59	0,35	
$M_{cc} = f(M)$	$M_{cc} = 0,022 * M$	0,45	0,20	
$M_{cp} = f(p)$	$M_{cp} = 77,597 * p$	0,84	0,71	0,53-1,64
$M_{cy} = f(p)$	$M_{cy} = 36,026 * p$	0,62	0,38	
$M_{cc} = f(p)$	$M_{cc} = 9,741 * p$	0,17	0,03	

Примечание: M – запас стволовой древесины, $m^3 * \text{га}^{-1}$; p – полнота; M_{cp} – запас углерода в растущей части древостоя, $tC * \text{га}^{-1}$; M_{cy} – запас углерода в усыхающей части древостоя, $tC * \text{га}^{-1}$; M_{cc} – запас углерода в сухостойной части древостоя, $tC * \text{га}^{-1}$. Оценки уравнений получены при уровне доверительной вероятности 95,4 %.

Note: M – stock of trunk wood, $m^3 * \text{ha}^{-1}$; p – completeness; M_{sp} – carbon stock in the growing part of the stand, $tS * \text{ha}^{-1}$; M_{su} – carbon stock in the declining part of the stand, $tS * \text{ha}^{-1}$; M_{sc} – carbon stock in the dead part of the stand, $tS * \text{ha}^{-1}$. Estimates of the equations were obtained at a confidence level of 95.4 %.

Источник: собственные вычисления авторов

Source: The authors' own calculations

Диапазон действия линейных моделей достаточно широк: для запаса 231-771 м³*га⁻¹; по полноте 0,53-1,64. При этом доля влияния входных переменных (запаса стволовой древесины и полноты) на запас углерода растущей и усыхающей части древостоя варьировала от 35 до 75 %. С целью прогнозирования сухостойной части без учета очагового отпада целесообразно использовать как регрессионные уравнения, так и средние величины вследствие высокой вероятности случайности данного фактора.

Выводы

В результате проведенных исследований получены следующие выводы:

1. Особенностью опытного объекта (сосняки расположены в подтаежно-лесостепной зоне Средней Сибири) является высокая густота и полнота, которые способствуют высокой продуктивности насаждений (древостои I, II классов бонитета).

2. Оценка санитарной категории сосняков позволила констатировать преимущественно «ослабленное» (согласно «Санитарным правилам...») и «поврежденное» (по В.А. Алексееву) состояние, что указывает на снижение общей устойчивости насаждений.

3. В растущей части насаждений расположено от 50 до 75 % общего запаса стволовой древесины; в усыхающей части доля участия запаса менялась в зависимости от состояния 10-45 %, и в сухостойной категории сконцентрировано от 5 до 20 % запаса.

4. Установлено, что в живой части сосняков депонировано от 46 до 118 тС*га⁻¹ (36,6-83,9 % общего запаса углерода). В усыхающей части древостоев сосредоточено от 16 до 59 тС*га⁻¹ (8,1-50,8 % общего запаса углерода). Потенциально-эмиссионный запас варьировал от 5 до 34 тС*га⁻¹ (1,4-28,4 % общего запаса углерода).

5. В высокополотных, густых сосняках подтаежно-лесостепного района Средней Сибири

устойчивость сосняков обусловлена комплексом факторов: возрастной структурой (при прекращении активной фазы роста у насаждений снижаются показатели жизненного состояния); полнотой (высокая густота ухудшает состояние деревьев); запасом (рост количества стволовой древесины на единице площади способствует увеличению усыхающей части соснового древостоя); климатическими условиями (возрастание температуры в вегетационный период и снижение количества осадков).

6. Регрессионный анализ позволил констатировать достоверную однокоэффициентную линейную связь углерода различных частей сосняков с запасом стволовой древесины и полнотой насаждений. При этом при прогнозировании углерода сухостойной части древостоя его необходимо делить на две части: обусловленную внешним воздействием (лесные пожары, стадия перестойности, фитопатологические условия) более 20 тС*га⁻¹ и вызванную естественным отпадом до 20 тС*га⁻¹. Итоговые уравнения позволяют считать, что запас углерода растущей части сосняков в среднем составляет 17,2 %, усыхающая часть аккумулирует около 8,0%, а в сухостойной части 2,2 % от общего стволового запаса древостоя. В долях от относительной полноты соотношение следующее: растущая часть – 77,6 %; усыхающая часть – 36,0 % и сухостойная часть – 9,7 %.

Таким образом, высокополотные сосновые древостои подтаежно-лесостепного района Средней Сибири относятся к категории «ослабленные». Качество условий местопроизрастания (I, II класс бонитета) не оказывает существенного влияния на санитарное состояние насаждений (в контексте высокой продуктивности всех насаждений). Причинами снижения устойчивости сосняков являются возраст, полнота, фитопатологическое состояние насаждений и климатические изменения.

Список литературы

1. Ваганов Е. А., Порфирьев Б. Н., Широков А. А., Колпаков А. Ю., Пыжев А. И. Оценка вклада российских лесов в снижение рисков климатических изменений. Экономика региона. 2021; 17(4): 1096–1109. DOI: <https://doi.org/10.17059/ekon.reg.2021-4-4>.

2. Замолодчиков Д. Г., Грабовский В. И., Шуляк П. П., Честных О. В. Современное сокращение стока углерода в леса России. Доклады Академии наук. 2017; 476(6): 719–721. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30267873>.
3. Кокорина Е. Г., Вайс А. А. Эскиз таблицы хода роста модальных сосновых насаждений на основе принципов динамической типологии. Хвойные бореальной зоны. 2021; 39(4): 257–262. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47174617&>.
4. Липка О. Н., Корзухин М. Д., Замолодчиков Д. Г. и др. Роль лесов в адаптации природных систем к изменениям климата. Лесоведение. 2021; 5: 531–546. DOI: 10.31857/S0024114821050077.
5. Матвеев С. М., Тимашук Д. А. Дендроклиматический анализ 200-летнего древостоя сосны обыкновенной в Воронежском биосферном заповеднике. Лесоведение. 2019; 2: 93–104. DOI: 10.1134/S0024114819020074.
6. Матюшевская Е. В., Киселев В. Н., Ярогов А. Е. О причинах усыхания сосны в Белорусском полесье. Журнал Белорусского государственного университета. География. Геология. 2021; 2: 82–90. DOI: <https://doi.org/10.33581/2521-6740-2021-2-82-90>.
7. Татаринцев А. И., Скрипальщикова Л. Н. Эколого-фитопатологическое состояние сосновых дендроценозов в лесах Красноярской группы районов. Хвойные бореальной зоны. 2018; 36(4): 322–333. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36728806>.
8. Chivulescu Ş., Pitar D., Apostol B., Leca Ş., Badea O. Importance of Dead Wood in Virgin Forest Ecosystem Functioning in Southern Carpathians. Forests. 2022; 13(3): 409. DOI: <https://doi.org/10.3390/f13030409>.
9. Harmon, M. E., Fasth B. G., Yatskov M. et al. Release of coarse woody detritus-related carbon: a synthesis across forest biomes. Carbon balance and management. 2020; 15(1): 1–21. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13021-019-0136-6>.
10. Ķēniņa L., Zute D., Jaunslaviete I., Samariks V., Jansons Ā. Old-Growth Coniferous Stands on Fertile Drained Organic Soil: First Results of Tree Biomass and Deadwood Carbon Stocks in Hemiboreal Latvia. Forests. 2022; 13(2): 279. DOI: <https://doi.org/10.3390/f13020279>.
11. Li W., Bi H., Watt D. et al. Estimation and Spatial Mapping of Residue Biomass following CTL Harvesting in Pinus radiata Plantations: An Application of Harvester Data Analytics. Forests. 2022; 13(3): 428. DOI: <https://doi.org/10.3390/f13030428>.
12. Man R., Rice M. Trembling Aspen Stand Response 15 Years after Windthrow, Salvage Harvesting, and Forest Renewal. Forests. 2022; 13(6): 843. DOI: <https://doi.org/10.3390/f13060843>.
13. Matkovsky V., Dolgova E., Lomakin N., Matveev S. Dendroclimatology and historical climatology of Voronezh region, European Russia, since 1790s. International Journal of Climatology. 2017; 37(7): 3057–3066. DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.4896>.
14. Tavankar F., Kivi A. R., Taheri-Abkenari K. et al. Evaluation of Deadwood Characteristics and Carbon Storage under Different Silvicultural Treatments in a Mixed Broadleaves Mountain Forest. Forests. 2022; 13(2): 259. DOI: <https://doi.org/10.3390/f13020259>.
15. Wang H., Zhang L., Deng W. et al. Habitat Significantly Affect CWD Decomposition but No Home-Field Advantage of the Decomposition Found in a Subtropical Forest, China. Forests. 2022; 13(6): 924. DOI: <https://doi.org/10.3390/f13060924>.

References

1. Vaganov E. A., Porfirev B. N., SHirov A. A., Kolpakov A. Yu., Pyzhev A. I. Ocenka vkladа rossijskih lesov v snizhenie riskov klimaticeskikh izmenenij [Assessment of the contribution of Russian forests in reducing the risks of climate change]. Ekonomika regiona = Regional Economy. 2021; 17(4): 1096–1109. (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.17059/ekon.reg.2021-4-4>.

2. Zamolodchikov D. G., Grabovskij V. I., SHulyak P. P., CHestnyh O. V. Sovremennoe sokrashchenie stoka ugleroda v lesa Rossii [Modern reduction of carbon flow in the forests of Russia]. *Doklady Akademii nauk = Reports of the Academy of Sciences*. 2017; 476(6): 719-721. (in Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30267873>.
3. Kokorina E. G., Vajs A. A. Eskiz tablicy hoda rosta modalnyh sosnovyh nasazhdenij na osnove principov dinamicheskoy tipologii [A draft of the growth rate table of modal pine plantations based on the principles of dynamic typology.]. *Hvojnye borealnoj zony = Conifers of the boreal zone*. 2021; 39(4): 257-262. (in Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47174617&>.
4. Lipka O. N., Korzuhin M. D., Zamolodchikov D. G. et al. M. Rol' lesov v adaptacii prirodnyh sistem k izmeneniyam klimata [The role of forests in the adaptation of natural systems to climate change]. *Lesovedenie = Russian Journal of Forest Science*. 2021; 5: 531-546. (in Russ.). DOI: 10.31857/S0024114821050077.
5. Matveev S. M., Timashchuk D. A. Dendroklimaticheskij analiz 200-letnego drevostoya sosny obyknovЕННОj v Voronezhskom biosfernom zapovednike [Dendroclimatic Assessment of a 200-Year-Old Scots Pine Stand in the Voronezh Biosphere Reserve]. *Lesovedenie = Russian Journal of Forest Science*. 2019; 2: 93-104. (in Russ.). DOI: 10.1134/S0024114819020074.
6. Matyushevskaya E. V., Kiselev V. N., Yarotov A. E. O prichinah usyhaniya sosny v Belarusskom polesye [On the causes of pine trees dieback in the Belarusian Polesye]. *Zhurnal Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta. Geografiya. Geologiya. = Journal of the Belarusian State University. Geography. Geology*. 2021; 2: 82-90. (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.33581/2521-6740-2021-2-82-90>.
7. Tatarincev A. I., Skripalshchikova L. N. Ekologo-fitopatologicheskoe sostoyanie sosnovyh dendrocenozov v lesah Krasnoyarskoj grupy rajonov [Ecological and phytopathological state of pine dendrocenoses in the forests of the Krasnoyarsk group of regions.]. *Hvojnye borealnoj zony = Conifers of the boreal zone*. 2018; 36(4): 322-333. (in Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36728806>.
8. Chivulescu Ş., Pitar D., Apostol B., Leca Ş., Badea O. Importance of Dead Wood in Virgin Forest Ecosystem Functioning in Southern Carpathians. *Forests*. 2022; 13(3): 409. DOI: <https://doi.org/10.3390/f13030409>.
9. Harmon M. E., Fasth B. G., Yatskov M. et al. Release of coarse woody detritus-related carbon: a synthesis across forest biomes. *Carbon balance and management*. 2020; 15(1): 1-21. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13021-019-0136-6>.
10. Ķēniņa L., Zute D., Jaunslaviete I., Samariks V., Jansons Ā. Old-Growth Coniferous Stands on Fertile Drained Organic Soil: First Results of Tree Biomass and Deadwood Carbon Stocks in Hemiboreal Latvia. *Forests*. 2022; 13(2): 279. DOI: <https://doi.org/10.3390/f13020279>.
11. Li W., Bi H., Watt D. et al. Estimation and Spatial Mapping of Residue Biomass following CTL Harvesting in *Pinus radiata* Plantations: An Application of Harvester Data Analytics. *Forests*. 2022; 13(3): 428. DOI: <https://doi.org/10.3390/f13030428>.
12. Man R., Rice M. Trembling Aspen Stand Response 15 Years after Windthrow, Salvage Harvesting, and Forest Renewal. *Forests*. 2022; 13(6): 843. DOI: <https://doi.org/10.3390/f13060843>.
13. Matskovsky V., Dolgova E., Lomakin N., Matveev S. Dendroclimatology and historical climatology of Voronezh region, European Russia, since 1790s. *International Journal of Climatology*. 2017; 37(7): 3057-3066. DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.4896>.
14. Tavankar F., Kivi A. R., Taheri-Abkenari K. et al. Evaluation of Deadwood Characteristics and Carbon Storage under Different Silvicultural Treatments in a Mixed Broadleaves Mountain Forest. *Forests*. 2022; 13(2): 259. DOI: <https://doi.org/10.3390/f13020259>.
15. Wang H., Zhang L., Deng W. et al. Habitat Significantly Affect CWD Decomposition but No Home-Field Advantage of the Decomposition Found in a Subtropical Forest, China. *Forests*. 2022; 13(6): 924. DOI: <https://doi.org/10.3390/f13060924>.

Сведения об авторах

Вайс Андрей Андреевич – доктор сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник научной лаборатории «Лесных экосистем» ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени акад. М.Ф. Решетнева», просп. им. газеты «Красноярский рабочий», д. 31, г. Красноярск, Российская Федерация, 660037, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4965-3670>, e-mail: vais6365@mail.ru

Михайлов Павел Владимирович – кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник научной лаборатории «Лесных экосистем» ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени акад. М.Ф. Решетнева», просп. им. газеты «Красноярский рабочий», д. 31, г. Красноярск, Российская Федерация, 660037, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3967-0709>, e-mail: mihaylov.p.v@mail.ru

Мельник Александра Игоревна – младший научный сотрудник научной лаборатории «Лесных экосистем» ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени акад. М.Ф. Решетнева», просп. им. газеты «Красноярский рабочий», д. 31, г. Красноярск, Российская Федерация, 660037, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1673-1639>, e-mail: aleksandrana2013@gmail.com

Чанчикова Светлана Анатольевна – младший научный сотрудник научной лаборатории «Лесных экосистем» ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени акад. М.Ф. Решетнева», просп. им. газеты «Красноярский рабочий», д. 31, г. Красноярск, Российская Федерация, 660037, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6283-1406>, e-mail: svetyleiii4ka@mail.ru

✉ *Герасимова Ольга Александровна* – кандидат сельскохозяйственных наук, младший научный сотрудник научной лаборатории «Лесных экосистем» ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени акад. М.Ф. Решетнева», просп. им. газеты «Красноярский рабочий», д. 31, г. Красноярск, Российская Федерация, 660037, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6498-5986>, e-mail: goa.1903@yandex.ru

Ануев Евгений Александрович – аспирант ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени акад. М.Ф. Решетнева», просп. им. газеты «Красноярский рабочий», д. 31, г. Красноярск, Российская Федерация, 660037, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1822-0795>, e-mail: djekizion@mail.ru

Неповинных Артем Геннадьевич – кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник научной лаборатории «Лесных экосистем» ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени акад. М.Ф. Решетнева», просп. им. газеты «Красноярский рабочий», д. 31, г. Красноярск, Российская Федерация, 660037, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9513-9950>, e-mail: artixz@yandex.ru

Information about the authors

Andrey A. Vais – DSc (Agric.), leading research assistant of Scientific Laboratory of Forest Ecosystems, FSBEI HE "Reshetnev Siberian State University of Science and Technology", Krasnoyarskii rabochii prospect, 31, Krasnoyarsk, Russian Federation 660037, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4965-3670>, e-mail: vais6365@mail.ru

Pavel V. Mikhailov – PhD (Agric.), leading research assistant of Scientific Laboratory of Forest Ecosystems, FSBEI HE "Reshetnev Siberian State University of Science and Technology", Krasnoyarskii rabochii prospect, 31, Krasnoyarsk, Russian Federation 660037, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3967-0709>, e-mail: mihaylov.p.v@mail.ru

Alexandra I. Melnik – junior research assistant of Scientific Laboratory of Forest Ecosystems, FSBEI HE "Reshetnev Siberian State University of Science and Technology", Krasnoyarskii rabochii prospect, 31, Krasnoyarsk, Russian Federation 660037, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1673-1639>, e-mail: aleksandrana2013@gmail.com

Svetlana A. Chanchikova – junior research assistant of Scientific Laboratory of Forest Ecosystems, FSBEI HE "Reshetnev Siberian State University of Science and Technology", Krasnoyarskii rabochii prospect, 31, Krasnoyarsk, Russian Federation 660037, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6283-1406>, e-mail: svetyleiii4ka@mail.ru

Природопользование

✉ *Olga A. Gerasimova* – PhD (Agric.), junior research assistant of Scientific Laboratory of Forest Ecosystems, FSBEI HE "Reshetnev Siberian State University of Science and Technology", Krasnoyarskii rabochii prospect, 31, Krasnoyarsk, Russian Federation 660037, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6498-5986>, e-mail: goa.1903@yandex.ru

Evgenij A. Anuev – postgraduate student, FSBEI HE "Reshetnev Siberian State University of Science and Technology", Krasnoyarskii rabochii prospect, 31, Krasnoyarsk, Russian Federation 660037, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1822-0795>, e-mail: djekizion@mail.ru

Artem G. Nepovinykh – PhD (Agric.), senior research assistant of Scientific Laboratory of Forest Ecosystems, FSBEI HE "Reshetnev Siberian State University of Science and Technology", Krasnoyarskii rabochii prospect, 31, Krasnoyarsk, Russian Federation 660037, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9513-9950>, e-mail: artixz@yandex.ru

✉- Для контактов/Corresponding author