

**Запасы углерода в надземной части древостоя
экспериментальных культур сосны скрученной
(*Pinus contorta* Dougl.) в условиях средней тайги
Республики Коми**

© 2026. Т. А. Пристова, к. б. н., н. с.,

Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения
Российской академии наук,
167982, Россия, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28,
e-mail: pristova@ib.komisc.ru

Проведена сравнительная оценка депонирования углерода в надземной фитомассе сосны скрученной (*Pinus contorta* Dougl.) и сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в экспериментальных культурах в условиях средней тайги Республики Коми. Культуры заложены в Сыктывкарском лесничестве посадкой 2-летних сеянцев весной 2006 г. на сосновой вырубке 2004 г. площадью 1 га. В качестве контроля использованы сеянцы сосны местного происхождения. С помощью метода модельных деревьев проведена оценка надземной фитомассы обеих пород. Определена концентрация углерода компонентов фитомассы изучаемых видов сосны. Установлено, что этот показатель в компонентах фитомассы изменяется от $47,5 \pm 1,7$ до $52,5 \pm 1,8$ % абсолютно сухого вещества. В результате проведённых исследований показано, что для большинства фракций надземной фитомассы сосны скрученной и сосны обыкновенной она довольно схожа, за исключением коры сосны скрученной, в которой содержание углерода выше, чем у сосны обыкновенной. Рассчитаны запасы углерода в кг на 1 дерево для разных ступеней толщины и для древостоев сосны скрученной и сосны обыкновенной в тоннах на 1 гектар (тС/га) абсолютно сухого вещества. Показано, что накопление углерода в расчёте на 1 дерево при одинаковой толщине у сосны скрученной выше, чем у сосны обыкновенной в 1,3–2,1 раза. Установлено, что сосна скрученная при густоте посадки 2,5 тыс. шт./га в 15-летнем возрасте накапливает 6,2 т С/га, сосна обыкновенная в 1,6 раза меньше. Впервые получены данные по концентрации и запасам углерода в культурах сосны скрученной. Результаты проведённых исследований могут использоваться для оценки депонирования углерода искусственными насаждениями.

Ключевые слова: искусственные насаждения, экспериментальные культуры, сосна скрученная (*Pinus contorta*), концентрация углерода, депонирование углерода в фитомассе.

**Carbon stocks in the aboveground phytomass
of experimental plantation of lodgepole pine (*Pinus contorta* Dougl.)
in the middle taiga of the Komi Republic**

© 2026. Т. А. Pristova ORCID: 0000-0002-8266-8113

Institute of Biology of Komi Science Centre
of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
28, Kommunisticheskaya St., Syktyvkar, Russia, 167982,
e-mail: pristova@ib.komisc.ru

A comparative assessment of carbon stocks in the aboveground phytomass of lodgepole pine (*Pinus contorta* Dougl.) and Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in experimental plantation in the middle taiga of the Komi Republic was carried out. The plantation was established in Syktyvkar forestry by planting 2-year-old seedlings in the spring 2006 on a pine cutting of 2004 with an area of 1 hectare. Pine seedlings of local origin were used as a control. The aboveground phytomass of both species was evaluated using the model tree method. It has been established that the carbon content in the phytomass components varies from 47.5 ± 1.7 to 52.5 ± 1.8 % of dry matter. As a result of the studies, it was shown that for most fractions of the aboveground phytomass of lodgepole pine and Scots pine, it is quite similar, with the exception of lodgepole pine bark, in which the carbon content is higher than that of Scots pine. Carbon stocks in kg per 1 tree are calculated for different diameters and for stands of lodgepole pine and Scots pine in tons per hectare (tC/ha) of dry matter. We detected that the accumulation of carbon per 1 tree with the same thickness in lodgepole pine is

1.3–2.1 times higher than in Scots pine. It was found that 15-year-old lodgepole pine with a planting density of 2500 seedlings per hectare accumulates 6.2 tC/ha, Scots pine is 1.6 times less. For the first time, data on the carbon content and its stocks in the lodgepole pine plantation were obtained. The results of the conducted studies can be used to assess carbon deposition in forest plantation.

Keywords: forest plantation, experimental cultures, lodgepole pine (*Pinus contorta* Dougl.), carbon content, carbon deposition in phytomass.

Леса России играют значительную роль в круговороте углерода. Лесные экосистемы переводят углерод атмосферы в неактивное состояние и выводят его из круговорота. Для оценки углеродного цикла и углерододепонирующей ёмкости лесных экосистем необходимы данные по содержанию, накоплению и распределению углерода в отдельных структурных элементах биогеоценозов в целом и в фитомассе в частности [1, 2].

Рубки являются одним из главных факторов воздействия на таёжные экосистемы Севера, которые приводят к изменениям основных параметров углеродного цикла. Потери запасов углерода лесами в результате рубок могут быть как обратимыми, так и необратимыми. При воспроизводстве лесов происходит постепенная компенсация запасов углерода в основном за счёт увеличения фитомассы древостоев [1, 2]. Послерубочное восстановление сосновых лесов на территории Республики Коми может происходить как в ходе естественного, так и искусственного восстановления [3].

В настоящее время вводится модель интенсивного использования и воспроизводства лесов, которая предусматривает ускоренное выращивание древесины, в том числе за счёт введения быстрорастущих древесных пород. Одной из таких пород для таёжной зоны Российской Федерации (РФ) является сосна скрученная (*Pinus contorta* Dougl.) – интродуцент, родиной которого является Северная Америка [4].

В европейской части России определена аккумуляция углерода в культурах сосны обыкновенной, которая в зависимости от возраста и густоты посадки составляет от 4 до 66 тС/га [5–8], при этом данных для культур сосны скрученной нами не обнаружено. В зарубежной литературе изучению углеродного цикла насаждений сосны скрученной посвящено несколько работ, проведённых в естественных древостоях Канады [9, 10], однако искусственные насаждения к настоящему времени в этом плане не исследованы. Целью работы является сравнительная оценка запасов углерода надземной части сосны скрученной

и сосны обыкновенной в экспериментальных культурах. В задачи исследований входило определение концентрации и количества углерода, накапливаемого в различных частях дерева, и особенностей его распределения в компонентах фитомассы древостоя для сосны скрученной и сосны обыкновенной.

Объекты и методы исследования

Исследования проводились в 15-летних экспериментальных культурах сосны скрученной в Краснозатонском участковом лесничестве (кв. 34) Сыктывкарского лесничества Республики Коми (61°40' с. ш. 51°03' в. д.). Подробное описание закладки экспериментальных культур на месте вырубki сосняка и их характеристика представлена ранее [11]. Почва – иллювиально-железистый подзол.

Для оценки запасов углерода в древостое исследуемых экспериментальных культур определена его фитомасса с использованием метода модельных деревьев [1, 12, 13]. Отбор моделей пропорционально представительству, по одному среднему из каждой ступени толщины, является наиболее точным [12]. Отобрано и проанализировано 10 модельных деревьев, в том числе 5 деревьев сосны скрученной и 5 – сосны обыкновенной. Взятие 10 моделей на пробной площади сосновых культур обеспечивает достаточно точное выравнивание методом наименьших квадратов [14]. На шести рядовых делянках проведён перебор деревьев по ступеням толщины (182 дерева сосны скрученной и 103 дерева сосны обыкновенной). Рассчитана фитомасса сосны скрученной (*Pinus contorta*) самого северного географического происхождения (штат Юкон, Канада) и контрольного варианта – сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) (Республика Коми, Россия). Растительные образцы для химического анализа отбирали в 5–10-кратной повторности для каждого компонента надземной части дерева обеих пород. Содержание углерода в растительных образцах определено в экоаналитической лаборатории Института биологии Коми НЦ УрО РАН по аттестованной методике измерений № 88-17641-94-2009

(ФР.1.31.2014.17663) «Методика выполнения измерений содержания углерода и азота в твердых объектах методом газовой хроматографии на элементном анализаторе EA 1110 (CHNS-O) (фирма CE Instruments, Италия)». Концентрация углерода приведена в % абсолютно сухого вещества (а. с. в.). Границы интервала абсолютной погрешности определения концентрации углерода (при уровне значимости $P = 0,95$) составили 1,7–1,8 %.

На основании данных по фитомассе древесных растений проведён расчёт запасов углерода путём перемножения массы структурных компонентов каждого вида на концентрацию в них углерода. Для оценки общего запаса углерода в надземной части древостоя исследуемых пород на единицу площади густоту насаждения принимали равной 2 тыс. экз./га. Данные по запасам углерода представлены в килограммах на одно дерево (кгС/дерево) и для всего древостоя – в тоннах на гектар (тС/га) абсолютно сухого вещества (а. с. в.).

Результаты и обсуждение

Концентрация углерода в исследуемых компонентах фитомассы изменяется от $47,5 \pm 1,7$ до $52,5 \pm 1,8$ % а. с. в. (табл. 1). Для большинства фракций фитомассы сосны скрученной и сосны обыкновенной концентрация углерода довольно близка.

Запасы углерода в модельных деревьях сосны обыкновенной с увеличением диаметра возрастают от 1,3 до 6,0, сосны скрученной – от 2,0 до 12,6 кгС/дерево (табл. 2). В ство-

ловой древесине модельных деревьев сосны обыкновенной аккумулируется от 36 до 52, в коре – от 6 до 8, в хвое – от 5 до 26, в живых ветвях – от 16 до 50 % от общего запаса углерода на 1 дерево. Для сосны скрученной распределение углерода на 1 дерево составляет для стволовой древесины – 40–44 %, в коре – 5–7, хвое – 12–29, живых ветвях – 23–43 % от общего запаса углерода на 1 дерево. Таким образом, с увеличением диаметра модельных деревьев обеих пород запасы углерода в них возрастают. Накопление углерода в расчёте на 1 дерево при одинаковой толщине у сосны скрученной выше, чем у сосны обыкновенной в 1,3–2,1 раза. Например, в модельных деревьях диаметром 10 см у сосны скрученной накапливается 12,59, у сосны обыкновенной – 6,02 кгС/дерево (табл. 2).

В исследуемых экспериментальных культурах при густоте посадки 2,5 тыс. шт./га в общей надземной части древостоя сосны скрученной депонируется 6 тС/га, сосны обыкновенной – 4 тС/га (табл. 3).

Сосна скрученная аккумулирует в стволовой древесине 2,5 тС/га, ветви – 1,7, хвоя – 1,6, стволовая кора – 0,4, сухие ветви – 0,04 тС/га, сосна обыкновенная – 1,7; 1,0; 0,8; 0,2 тС/га соответственно.

Анализ данных по содержанию углерода в различных компонентах фитомассы показал, что статистически значимые различия в концентрации углерода между изучаемыми видами наблюдаются только для стволовой коры. В коре сосны скрученной содержание углерода достигает максимального значения среди ана-

Таблица 1 / Table 1

Концентрация углерода в надземной части сосны обыкновенной и сосны скрученной, % а. с. в.
Carbon content in aboveground part of Scots and lodgepole pine, % dry matter

Компонент фитомассы Phytomass component	Сосна скрученная Lodgepole pine	Сосна обыкновенная Scots pine
Хвоя / Needles		
1 года / 1 years old	$49,6 \pm 1,7$	$49,6 \pm 1,7$
2 года / 2 years old	$50,4 \pm 1,8$	$50,3 \pm 1,8$
3 года / 3 years old	$49,8 \pm 1,7$	$49,9 \pm 1,8$
4 года / 4 years old	$50,1 \pm 1,8$	–
Ветви / Branches		
живые / living	$50,4 \pm 1,8$	$49,6 \pm 1,7$
сухие / dry	$51,3 \pm 1,8$	$51,1 \pm 1,8$
Ствол / Stem		
древесина / wood	$47,5 \pm 1,7$	$47,8 \pm 1,7$
кора / bark	$52,5 \pm 1,8$	$48,3 \pm 1,7$

Примечание: $\pm \Delta$ – границы интервала абсолютной погрешности при $p = 0,95$. Прочерк означает отсутствие данного компонента фитомассы.

Note: $\pm \Delta$ is the boundary of the absolute error interval at $p = 0.95$. A dash means the absence of this phytomass component.

Таблица 2 / Table 2

Содержание углерода в надземной части модельных деревьев сосны обыкновенной и сосны скрученной, кгС/дерево / Carbon content in the aboveground part of Scots and lodgepole pine model trees, kgC/tree

Диаметр, см Diameter, cm	Высота, м Height, m	Длина кроны, м Crown length, m	Хвоя / Needles				Ветви Branches		Ствол Stem		Всего Total
			1 года 1 years old	2 года 2 years old	3 года 3 years old	4 года 4 years old	живые living	сухие dry	древесина wood	кора bark	
Сосна обыкновенная / Scots pine											
4	4,1	3,1	0,06	0,15	0,11	–	0,21	0,01	0,66	0,09	1,29
5	4,5	3,8	0,08	0,12	0,07	–	0,56	0,14	0,72	0,15	1,84
6	4,8	3,5	0,12	0,14	0,17	–	0,30	0,11	0,70	0,09	1,63
7	5,1	4,1	0,10	0,08	0,09	–	0,74	0,18	1,48	0,19	2,86
10	5,5	4,7	0,08	0,12	0,11	–	3,02	0,16	2,15	0,39	6,02
Сосна скрученная / Lodgepole pine											
4	4,6	4,1	0,12	0,14	0,12	0,13	0,46	0,01	0,86	0,14	1,98
5	4,5	4,4	0,08	0,09	0,10	0,29	0,62	0,01	1,06	0,14	2,39
7	5,4	4,2	0,08	0,46	0,35	0,21	1,43	0,05	1,92	0,32	4,82
8	6,5	5,3	0,49	0,72	0,56	0,66	1,96	–	3,63	0,39	8,41
10	7,2	6,7	0,27	0,37	0,37	0,55	5,41	0,12	4,89	0,61	12,59

Примечание: прочерк означает отсутствие данного компонента фитомассы.
Note: A dash means the absence of this phytomass component.

Таблица 3 / Table 3

Запасы углерода в надземной части древостоя культур сосны, тС/га
Carbon stocks in the aboveground part of the pine plantation stand, tC/ha

Диаметр, см Diameter, cm	Хвоя Needles	Ветви / Branches		Ствол / Stem		Всего Total
		живые living	сухие dry	древесина wood	кора bark	
Сосна обыкновенная / Scots pine						
4	0,28 ± 0,02	0,19 ± 0,02	0,010 ± 0,001	0,59 ± 0,04	0,080 ± 0,001	1,15 ± 0,05
5	0,19 ± 0,02	0,39 ± 0,02	0,100 ± 0,001	0,50 ± 0,04	0,100 ± 0,001	1,28 ± 0,05
6	0,06 ± 0,01	0,11 ± 0,01	0,020 ± 0,001	0,20 ± 0,02	0,020 ± 0,001	0,41 ± 0,02
7	0,09 ± 0,01	0,15 ± 0,01	0,040 ± 0,002	0,30 ± 0,02	0,040 ± 0,001	0,62 ± 0,03
10	0,17 ± 0,01	0,18 ± 0,02	0,010 ± 0,001	0,13 ± 0,01	0,020 ± 0,001	0,51 ± 0,03
Всего / Total	0,79 ± 0,02	1,01 ± 0,02	0,180 ± 0,010	1,72 ± 0,05	0,260 ± 0,010	3,97 ± 0,06
Сосна скрученная / Lodgepole pine						
4	0,37 ± 0,03	0,34 ± 0,03	0,003 ± 0,001	0,63 ± 0,07	0,10 ± 0,01	1,44 ± 0,06
5	0,47 ± 0,04	0,53 ± 0,07	0,004 ± 0,001	0,91 ± 0,08	0,12 ± 0,01	2,03 ± 0,09
7	0,31 ± 0,02	0,29 ± 0,03	0,010 ± 0,004	0,25 ± 0,03	0,07 ± 0,01	0,93 ± 0,10
8	0,30 ± 0,02	0,20 ± 0,02	0,010 ± 0,003	0,40 ± 0,03	0,04 ± 0,01	0,95 ± 0,20
10	0,15 ± 0,02	0,33 ± 0,03	0,007 ± 0,002	0,29 ± 0,03	0,04 ± 0,01	0,82 ± 0,02
Всего / Total	1,60 ± 0,06	1,69 ± 0,05	0,035 ± 0,010	2,48 ± 0,06	0,37 ± 0,40	6,17 ± 0,10

лизируемых образцов. Возможно, что более высокое содержание углерода в стволовой коре сосны скрученной обусловлено видоспецифичностью. Концентрация углерода для остальных компонентов фитомассы у обоих видов довольно схожа. Для обеих пород наиболее низкие концентрации углерода наблюдаются в стволовой древесине – 47,5–47,8, наиболее высокие в сухих ветвях – 51,1–51,3 % а. с. в. Для сосны обыкновенной в естественных среднетаёжных сосняках Республики Коми, по сравнению с исследуемыми культурами, концентрация углерода в хвое и ветвях немного ниже – 46,3 и 47,2 % соответственно, для стволовой древесины и коры значения близки – 47,9 и 48,6 % соответственно [15]. Другими исследователями приводятся схожие значения содержания углерода в ветвях сосны обыкновенной 50,0 % и более высокие в стволах – 50,2 % и хвое – 51,3 % [16]. В литературе данных по концентрации углерода для сосны скрученной нами не обнаружено, поэтому полученные данные представляют определённую новизну и в дальнейшем могут использоваться при оценке запасов углерода в древостоях сосны скрученной в условиях Севера.

По мере увеличения диаметра модельных деревьев с 4 до 10 см масса практически всех частей дерева обеих пород возрастает, за исключением сухих ветвей. Это связано с тем, что усыхание нижних ветвей начинается по достижении определённого запаса насаждения на 1 гектар и происходит постепенно [12]. Согласно полученным данным, закономерных изменений в процентном соотношении запасов углерода для отдельных частей дерева в зависимости от диаметра для исследуемых пород не наблюдается. Соотношение отдельных компонентов фитомассы в накоплении углерода на одно дерево между сосной скрученной и сосной обыкновенной несколько различается. Так, для модельного дерева сосны скрученной диаметром 10 см характерна более высокая доля накопления углерода в хвое по сравнению с сосной обыкновенной. Эти различия обусловлены рядом особенностей ассимиляционного аппарата сосны скрученной по сравнению с сосной обыкновенной: в среднем длина хвоинки на 20 %, масса на 40 % больше, продолжительность жизни хвои на терминальном побеге примерно на 1 год дольше [17]. Также можно отметить, что в сухих сучьях у модельных деревьев сосны скрученной аккумулируется значительно меньше углерода, чем у сосны обыкновенной.

Анализ литературных данных показал, что близкие к полученным нами значения депонирования углерода в фитомассе древостоя сосны обыкновенной приводятся для 20-летних посевов Вологодской области при густоте 4–5 тыс. шт./га – 6 тС/га [6] и 17-летних культур сосны обыкновенной в Казахстане 3–5 тС/га [16]. Более высокие значения этого показателя приводятся для 24-летних культур сосны обыкновенной в Архангельской области при густоте посадки 4 тыс. шт./га – 65,7 тС/га [8], 21-летних культур Красноярского края при густоте 1,2 тыс. шт./га – 20 тС/га [18], и 10-летних культур Ульяновской области с густотой около 7 тыс. шт./га – от 8,8 до 12,0 тС/га [7]. Данных, по депонированию углерода в культурах сосны скрученной в литературе нами не обнаружено, поэтому представленные результаты имеют определённый интерес при изучении углеродного цикла этой древесной породы.

В стволовой древесине сосны скрученной запасы углерода выше, чем у сосны обыкновенной, на 31 % от общих запасов углерода в надземной фитомассе. Это косвенно согласуется с данными ряда исследователей по объёму ствола – сосна скрученная превышает сосну обыкновенную на 17–38 % [11, 19, 20], также отмечается, что сосна скрученная превосходит сосну обыкновенную по высоте до 1,3, по диаметру – до 1,6 раз [17, 21].

Анализ полученных данных показал, что более 70 % запасов углерода в древостое сосны обыкновенной и сосны скрученной сосредоточено в деревьях толщиной 4–6 см. Это связано с особенностями распределения деревьев по ступеням толщины: около 80 % деревьев обеих пород имеют диаметр 4–6 см.

Распределение углерода в надземной фитомассе древостоя для обеих пород очень близко: на долю стволовой древесины в среднем приходится 40–43 %, ветвей 26–27 %, хвои 20–26 %, стволовой коры 6–7 % от общих запасов углерода. Изучаемые виды сосны различаются по накоплению углерода в сухих ветвях: для сосны обыкновенной достигают 8 %, а для сосны скрученной не превышают 1 % от общих запасов углерода в надземной части древостоя. Довольно близкие значения по распределению углерода в надземной фитомассе древостоя 20-летних посевов сосны обыкновенной приводятся для Вологодской области: в стволовой древесине – 40, хвое – 26, сухих ветвях – 4 % от общего количества углерода, депонированного в надземной части древостоя, при этом для живых ветвей при-

водятся более низкие показатели [12]. Для 24-летних культур сосны обыкновенной в Архангельской области приводятся близкие показатели по доле накопления углерода в ветвях (9,8 %), сухих сучьях (4,3 %) и коре (8,2 %), но для древесины эти значения выше (71,5 %), а для хвои – ниже (6,2 %) [8], чем в наших исследованиях. Это обусловлено тем, что с возрастом количество углерода, депонированного в стволовой древесине культур сосны обыкновенной, увеличивается [6, 8]. Также это связано со спецификой аккумуляции органического вещества в частях дерева в зависимости от возраста. Так, для 13-летних культур сосны обыкновенной Архангельской области в лишайниковом типе условий произрастания на стволовую древесину приходится 37–38, для 22-летних – 48–56 % от общих запасов органического вещества в фитомассе насаждения [6]. При этом в 30-летних посевах сосны скрученной в Швеции запасы стволовой древесины достигают 70 % от общих запасов органического вещества в надземной фитомассе древостоя [22].

Следует отметить, что доля участия хвои в депонировании углерода надземной частью фитомассы сосны скрученной на 6 % выше, чем у сосны обыкновенной, а древесины, наоборот, на 3 % ниже, коры и ветвей (живых) – приблизительно одинакова для обоих видов. Таким образом, сосна скрученная в 15-летних экспериментальных культурах, несмотря на схожую с сосной обыкновенной концентрацию углерода, накапливает в надземной фитомассе на 36 % больше углерода, что указывает на более высокие углерододепонирующие свойства этой породы при искусственном выращивании в средней тайге Республики Коми.

Выводы

Установлено, что запасы углерода надземной части древостоя в экспериментальных культурах Сыктывкарского лесничества Республики Коми при густоте посадки 2,5 тыс. шт/га составляют для сосны скрученной 6,2 тС/га а. с. в., что в 1,6 раза больше, чем для сосны обыкновенной.

Концентрация углерода в различных частях дерева для сосны скрученной и сосны обыкновенной изменяется от $47,5 \pm 1,7$ до $52,5 \pm 1,8$ % а. с. в. Определено, что для большинства фракций фитомассы исследуемых видов содержание углерода приблизительно одинаково, за исключением стволовой коры сосны скрученной.

Сравнение запасов углерода в компонентах фитомассы показало, что в стволовой древесине сосны скрученной накапливается на 31 %, в коре – на 30, в хвое – на 51 и ветвях – на 40 % больше углерода, чем в сосне обыкновенной.

Оценка распределения углерода в надземной части древостоя показала сходство между исследуемыми породами: на долю стволовой древесины в среднем приходится 40–43 %, ветвей – 26–27 %, хвои – 20–26 %, коры – 6–7 % от общих запасов углерода в надземной части фитомассы.

Полученные данные могут использоваться при изучении углеродного цикла и оценке депонирования углерода искусственными насаждениями сосны обыкновенной и сосны скрученной в условиях средней тайги.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме «Средообразующая роль и продуктивность лесных и болотных экосистем европейского северо-востока России» № 125020501547-8.

Выражаю благодарность А. Л. Федоркову и А. И. Патову за всестороннюю помощь в работе, а также ведущему инженеру-химику ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН Е. А. Тумановой за выполнение химических анализов

Литература

1. Усольцев В.А., Залесов С.В. Методы определения биологической продуктивности насаждений. Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2005. 147 с.
2. Пулы и потоки углерода в надземных экосистемах России / Под ред. Г.А. Заварзина. М.: Наука, 2007. 315 с.
3. Лиханова И.А., Пыстина Т.Н., Шушпанникова Г.С., Железнова Г.В. Восстановление сосняков лишайниковых на карьерах среднетаёжной подзоны Северо-востока европейской части России // Теоретическая и прикладная экология. 2021. № 2. С. 196–201. doi: 10.25750/1995-4301-2021-2-196-201
4. Мелехов И.С. Интродукция хвойных в лесном хозяйстве // Лесоведение. 1984. № 6. С. 72–78.
5. Казанкин А.А. Фитомасса и органический углерод культур сосны Республики Марий Эл: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Йошкар-Ола: Марийс. гос. техн. ун-т, 2002. 24 с.
6. Бабич Н.А., Клевцов Д.Н., Евдокимов И.В. Зональные закономерности изменения фитомассы культур сосны. Архангельск: Северный (Арктический) федеральный университет, 2010. 140 с.
7. Чураков Б.П., Манякина Е.В. Депонирование углерода разновозрастными культурами сосны // Ульяновский медико-биологический журнал. 2012. № 1. С. 125–129.

8. Сунгурова Н.Р., Худяков В.В., Страздаускас С.Е. Сравнительная структура углеродного пула в надземной фитомассе культур сосны и ели // Изв. вузов. Лесн. журн. 2019. № 3. С. 159–165. doi: 10.17238/issn0536-1036.2019.3.159
9. Brown M.G., Black T.A., Nesic Z., Fredeen A.L., Foord V.N., Spittlehouse D.L., Bowler R., Burton P.J., Trofymow J.A., Grant N.J., Lessard D. The carbon balance of two longepole pine beetle stands recovering from mountain pine beetle attack in British Columbia // Agric. For. Meteorol. 2012. V. 153. P. 82–93. doi: 10.1016/j.agroformet.2011.07.010
10. Sullivan T.P., Sullivan D.S., Lindgren P.M.F., Ransome D.B., Zabek L. Twenty-five years after stand thinning and repeated fertilization in lodgepole pine forest: imprecations for tree growth, stand structure and carbon sequestration // Forests. 2020. V. 11. No. 3. Article No. 337. doi: 10.3390/f11030337
11. Fedorkov A., Gutiy L. Performance of lodgepole pine and Scots pine in field trials located in north-west Russia // Silva Fennica. 2017. V. 51. No. 1. Article No. 1692. doi: 10.14214/af.1692
12. Бабич Н.А., Мерзленко М.Д. Биологическая продуктивность лесных культур. Архангельск: Изд-во АГТУ, 1998. 89 с.
13. Repola J. Biomass equations for Scots pine and Norway spruce in Finland // Silva Fennica. 2009. V. 43. No. 4. P. 625–647. doi: 10.14214/sf.184
14. Уткин А.И., Ифанова М.Г., Ермолова Л.С. Первичная биологическая продуктивность культур сосны обыкновенной во Владимирской области // Лесоведение. 1981. № 4. С. 19–27.
15. Бобкова К.С., Тужилкина В.В. Содержание углерода и калорийность органического вещества в лесных экосистемах Севера // Экология. 2001. № 1. С. 69–74.
16. Tumenbayeva A.R., Sarsekova D.N., Małek S. Carbon sequestration of above-ground biomass of *Pinus sylvestris* L. in the green belt of the city of Astana // Folia Forestalia Polonica, Series A – Forestry. 2018. V. 60. No. 3. P. 137–142. doi: 10.2478/ffp-2018-0013
17. Феклистов П.А., Бирюков С.Ю., Федяев А.Л. Сравнительные эколого-биологические особенности сосны скрученной и обыкновенной в северной подзоне европейской тайги. Архангельск: Архангельский гос. техн. ун-т, 2008. 118 с.
18. Горбунова Ю.В. Баланс углерода в культурах сосны техногенных ландшафтов // Вестник КрасГАУ. 2008. № 2. С. 142–148.
19. Раевский Б.В., Пеккоев А.Н. Перспективы выращивания сосны скрученной в Южной Карелии // Инновации и технологии в лесном хозяйстве – 2013: материалы III междунар. науч.-практ. конф. Ч. 2. СПб.: СПбНИИЛХ, 2013. С. 182–193.
20. Elfving B., Ericsson T., Rosvall O. The introduction of lodgepole pine for wood production in Sweden – a review // For. Ecol. Manage. 2001. V. 141. No. 1–2. P. 15–29. doi: 10.1016/S0378-1127(00)00485-0
21. Демидова Н.А., Дуркина Т.М., Гоголева Л.Г., Демиденко С.А., Быков Ю.С., Парамонов А.А. Рост и развитие сосны скрученной (*Pinus contorta* Loud. var. *latifolia* S. Wats) в условиях северной тайги // Труды Санкт-петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства. 2016. № 2. С. 45–59. doi: 10.24178/2079-6080.2016.2.42
22. Backlund I., Bergsten U. Biomass production of dense direct-seeded longepole pine (*Pinus contorta*) at short rotation periods // Silva Fennica. 2012. V. 46. No. 4. P. 609–623. doi: 10.14214/sf.1321

References

1. Usol'cev V.A., Zalesov S.V. Methods for determining the biological productivity of plantations. Ekaterinburg: Ural'skiy gosudarstvennyy lesotekhnicheskii universitet, 2005. 147 p. (in Russian).
2. Carbon pools and fluxes in the aboveground ecosystems of Russia. Moskva: Nauka, 2007. 315 p. (in Russian).
3. Likhanova I.A., Pystina T.N., Shushpannikova G.S., Zheleznova G.V. Reforestation of lichen pine forests at the open pits in the middle taiga of the North-East of European part of Russia // Theoretical and Applied Ecology. 2021. No. 2. P. 196–201 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2021-2-196-201
4. Melekhov I.S. Introduction of conifers in forestry // Lesovedenie. 1984. No. 6. P. 72–78 (in Russian).
5. Kazankin A.A. Phytomass and organic carbon of pine plantations of the Mari El Republic: abstr. diss. ... Candidate of Agricultural Sciences. Yoshkar-Ola: Mariyskiy gosudarstvennyy tekhnicheskii universitet, 2002. 24 p. (in Russian).
6. Babich N.A., Klevcov D.N., Evdokimov I.V. Zonal patterns of phytomass changes in the pine plantations. Arhangel'sk: Severnyj (Arkticheskij) federal'nyj universitet, 2010. 140 p. (in Russian).
7. Churakov B.P., Manyakina E.V. Carbon deposition by uneven-age cultures of pine // Ulyanovsk medicobiological journal. 2012. No. 1. P. 125–129 (in Russian).
8. Sungurova N.R., Hudyakov V.V., Strazdauskas S.E. Comparative structure of the carbon pool in the above-ground phytomass of pine and spruce plantations // Russian forestry journal. 2019. No. 3. P. 159–165 (in Russian). doi: 10.17238/issn0536-1036-2019.3.159
9. Brown M.G., Black T.A., Nesic Z., Fredeen A.L., Foord V.N., Spittlehouse D.L., Bowler R., Burton P.J., Trofymow J.A., Grant N.J., Lessard D. The carbon balance of two longepole pine beetle stands recovering from mountain pine beetle attack in British Columbia // Agric. For. Meteorol. 2012. V. 153. P. 82–93. doi: 10.1016/j.agroformet.2011.07.010
10. Sullivan T.P., Sullivan D.S., Lindgren P.M.F., Ransome D.B., Zabek L. Twenty-five years after stand

thinning and repeated fertilization in lodgepole pine forest: imprecations for tree growth, stand structure and carbon sequestration // *Forests*. 2020. V. 11. No. 3. Article No. 337. doi: 10.3390/f11030337

11. Fedorkov A., Gutiy L. Performance of lodgepole pine and Scots pine in field trials located in north-west Russia // *Silva Fennica*. 2017. V. 51. No. 1. Article No. 1692. doi: 10.14214/af.1692

12. Babich N.A., Merzlenko M.D. Biological productivity of forest plantations. Arkhangelsk: Izdatelstvo Arkhangel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, 1998. 89 p. (in Russian).

13. Repola J. Biomass equations for Scots pine and Norway spruce in Finland // *Silva Fennica*. 2009. V. 43. No. 4. P. 625–647. doi: 10.14214/sf.184

14. Utkin A.I., Ifanova M.G., Ermolova L.S. Primary biological productivity of Scots pine crops in the Vladimir region // *Lesovedenie*. 1981. No. 4. P. 19–27 (in Russian).

15. Bobkova K.S., Tuzhilkina V.V. Carbon content and calorific value of organic matter in the North forest ecosystems // *Ekologiya*. 2001. No. 1. P. 69–74 (in Russian).

16. Tumenbayeva A.R., Sarsekova D.N., Malek S. Carbon sequestration of above-ground biomass of *Pinus sylvestris* L. in the green belt of the city of Astana // *Folia Forestalia Polonica, Series A – Forestry*. 2018. V. 60. No. 3. P. 137–142. doi: 10.2478/ffp-2018-0013

17. Feklistov P.A., Biryukov S.Yu., Fedyayev A.L. Comparative ecological and biological features of lodgepole and Scotch pine in the northern subzone of the European taiga. Arkhangelsk: Arkhangel'skiy gosudarstvennyy tekhnicheskiiy universitet, 2008. 118 p. (in Russian).

18. Gorbunova Yu.V. Carbon balance in pine cultures of technogenic landscapes // *Bulletin of KrasGAU*. 2008. No. 2. P. 142–148 (in Russian).

19. Raevskij B.V., Pekkoev A.N. Some perspectives of lodgepole pine planting in South Karelia // *Innovations and technologies in forestry – 2013: conference proceedings. Pt. 2*. Sankt-Peterburg: SPbNIIKKh, 2013. P. 182–193 (in Russian).

20. Elfving B., Ericsson T., Rosvall O. The introduction of lodgepole pine for wood production in Sweden – a review // *For. Ecol. Manage.* 2001. V. 141. No. 1–2. P. 15–29. doi: 10.1016/S0378-1127(00)00485-0

21. Demidova N.A., Durkina T.M., Gogoleva L.G., Demidenko S.A., Bykov Yu.S., Paramonov A.A. Growth and development of lodgepole pine (*Pinus contorta* Loud. var. *latifolia* S. Wats) in the northern boreal forest // *Proceedings of the Saint Petersburg Forestry Research Institute*. 2016. No. 2. P. 45–59 (in Russian). doi: 10.21178/2079-6080.2016.2.42

22. Backlund I., Bergsten U. Biomass production of dense direct-seeded longepole pine (*Pinus contorta*) at short rotation periods // *Silva Fennica*. 2012. V. 46. No. 4. P. 609–623. doi: 10.14214/sf.1321