

Научная статья

УДК 630*52:630*231

DOI: 10.37482/0536-1036-2024-6-35-49

Динамика биометрических и углеродных показателей сосновых насаждений на залежных землях Красноярской лесостепи

А.А. Вайс¹✉, д-р с.-х. наук, доц.; ResearcherID: [AAC-7051-2019](https://orcid.org/0000-0003-4965-3670),

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

Г.С. Вараксин², д-р с.-х. наук, проф.; ResearcherID: [HNJ-3503-2023](https://orcid.org/0000-0003-4335-4784),

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

С.К. Мамедова¹, аспирант; ResearcherID: [ABB-6484-2022](https://orcid.org/0000-0001-9972-0021),

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

А.А. Андропова¹, аспирант; ResearcherID: [KFB-0481-2024](https://orcid.org/0000-0001-7079-0819),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7079-0819>

¹Сибирский государственный университет науки и технологий им. академика М.Ф. Решетнёва, просп. им. газеты «Красноярский рабочий», д. 31, г. Красноярск, Россия, 660037; vais6365@mail.ru✉, mamedova_ceva@mail.ru, economics25192715@gmail.com

²Институт леса им. В.Н. Сукачёва Красноярского научного центра СО РАН, ул. Академгородок, д. 50/28, г. Красноярск, Россия, 660036; varaksings@mail.ru

Поступила в редакцию 08.10.23 / Одобрена после рецензирования 23.12.23 / Принята к печати 26.12.23

Аннотация. Сегодня серьезной проблемой является зарастание древесно-кустарниковой растительностью бывших аграрных земель. Цель исследования – изучение возрастных изменений таксационных показателей древостоев залежных земель. Учет временного фактора при мониторинге бюджета углерода позволяет выявить ряд процессов динамики депонирования углерода, которые невозможно оценить при однократном исследовании. Для решения этой задачи проанализированы данные постоянных пробных площадей в 2011 г. с повторным обмером в 2023 г. Пробные площади расположены на залежах на границе ареала Красноярской лесостепи. Динамика процесса зарастания и развития насаждений показала, что по мере формирования залежей кроме доминирующих сосны (*Pinus sylvestris* L.), березы (*Betula pendula* Roth), осины (*Populus tremula* L.) встречаются лиственница (*Larix sibirica* Ledeb.), ель (*Picea obovata* Ledeb.) и ива (*Salix caprea* L.). Динамический процесс сосновых залежей установлен за период 15–27 лет после забрасывания земель. Смешанные насаждения различного сукцессионного происхождения имели возраст 10–30 лет. На участках наблюдались различные процессы изменения густоты залежей (зарастание, изреживание). Лесовосстановление залежей происходит от стены леса и при расстоянии до 50 м продолжается после 30 лет. Для залежей характерны все возможные формы зарастания: куртинная, био группами, сплошная, одиночные деревья. Средняя количественная оценка показала, что наиболее интенсивные изменения высоты, диаметра, высоты начала кроны, высоты максимального диаметра кроны и диаметров крон происходили на пробной площади, где наблюдалась минимальная густота, которая в динамике уменьшалась. На участке с максимальной густотой морфологические показатели характеризовались средним приростом. Минимальные изменения зафиксированы на пробной площади, где густота значительно возросла за 12 лет. Интенсивность роста деревьев одного диаметра в высоту больше

в 2023 г. в сравнении с 2011 г. Возможно, на это оказывал влияние комплекс внешних и внутренних факторов, в т. ч. климатические изменения. Для оценки углеродной продуктивности древостоев залежей целесообразно применять регрессионные уравнения, разработанные для конкретной местности. Результаты исследования динамики депонирования углерода молодняками на залежных землях указывают на целесообразность использования постаграрных земель для реализации лесоклиматических проектов.

Ключевые слова: залежные земли, постаграрные земли, динамика зарастания, зарастание залежных земель, таксационные показатели, продуктивность древостоя

Благодарности: Исследование проводилось в рамках госзадания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации для реализации проекта «Динамика восстановления таежных лесов Центральной Сибири, нарушенных энтомовредителями» (№ FEFE-2024-0029) коллективом научной лаборатории «Лесных экосистем».

Для цитирования: Вайс А.А., Вараксин Г.С., Мамедова С.К., Андропова А.А. Динамика биометрических и углеродных показателей основных насаждений на залежных землях Красноярской лесостепи // Изв. вузов. Лесн. журн. 2024. № 6. С. 35–49. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-6-35-49>

Original article

Dynamics of Biometric and Carbon Indicators of Pine Plantations Growing on the Abandoned Farmlands of the Krasnoyarsk Forest-Steppe

Andrey A. Vais¹✉, Doctor of Agriculture, Assoc. Prof.; ResearcherID: [AAC-7051-2019](https://orcid.org/0000-0003-4965-3670), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4965-3670>

Gennadij S. Varaksin², Doctor of Agriculture, Prof.; ResearcherID: [HNJ-3503-2023](https://orcid.org/0000-0003-4335-4784), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4335-4784>

Sevinch K. Mamedova¹, Postgraduate Student; ResearcherID: [ABB-6484-2022](https://orcid.org/0000-0001-9972-0021), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9972-0021>

Alina A. Andronova¹, Postgraduate Student; ResearcherID: [KFB-0481-2024](https://orcid.org/0000-0001-7079-0819), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7079-0819>

¹Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, prosp. imeny gazety “Krasnoyarskiy rabochiy”, 31, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation; vais6365@mail.ru✉, mamedova_ceva@mail.ru, economics25192715@gmail.com

²Sukachev Institute of Forest of the Siberian Branch of the RAS – Division of Federal Research Center “Krasnoyarsk Scientific Center of the Siberian Branch of the RAS”, Akademgorodok, 50/28, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation; varaksings@mail.ru

Received on October 8, 2023 / Approved after reviewing on December 23, 2023 / Accepted on December 26, 2023

Abstract. Today, the overgrowth of woody and shrubby vegetation on former agricultural lands is a serious problem. The aim of this research has been to investigate age-related changes in the forest inventory indicators of forest stands on abandoned farmlands. Taking into account the temporal factor when monitoring the carbon budget allows identifying a number of processes in the dynamics of carbon sequestration that cannot be estimated in a single study. To address this issue, data from permanent sample plots have been analyzed in 2011 with repeated measurements in 2023. The sample plots are located on the abandoned farmlands on the border of the Krasnoyarsk forest-steppe area. The dynamics of the process of



overgrowth and development of plantations has shown that as the abandoned farmlands form, in addition to the dominant Scots pine (*Pinus sylvestris* L.), silver birch (*Betula pendula* Roth) and aspen (*Populus tremula* L.), Siberian larch (*Larix sibirica* Ledeb.), Siberian spruce (*Picea obovata* Ledeb.) and goat willow (*Salix caprea* L.) are also found. The dynamic process of pine abandoned farmlands has been established over a period of 15 to 27 years after land abandonment. The mixed plantations of various successional origins have ranged in age from 10 to 30 years old. Various processes have been observed in the research plots in terms of changes in the density of abandoned farmlands (overgrowth, thinning). The reforestation of abandoned farmlands occurs from the forest border and at a distance of up to 50 m continues after 30 years. The abandoned farmlands are characterized by various forms of overgrowth: clumps, biogroups, complete and by single trees. The average quantitative assessment has shown that the most intense changes in height, diameter, height to the crown base, height to the largest crown width, and crown diameters have occurred in the test area where the minimum density has been observed, which has been decreasing dynamically. In the plot with the maximum density, morphological indicators have been characterized by an average increase. Minimal changes have been recorded in the sample plot where the density has increased significantly over 12 years. The growth rate of trees of the same diameter in height has been greater in 2023 compared to 2011. It is possible that this has been influenced by a combination of external and internal factors, including climate change. To assess the carbon productivity of forest stands growing on the abandoned farmlands, it is advisable to use regression equations developed for a specific area. The results of the study of the dynamics of carbon sequestration by young forests growing on the abandoned farmlands indicate the feasibility of using postagrarian lands for the implementation of forest climate projects.

Keywords: abandoned farmlands, postagrarian lands, overgrowth dynamics, overgrowth of the abandoned farmlands, forest inventory indicators, forest stand productivity

Acknowledgements: The research was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation for the implementation of the project “Dynamics of Restoration of Taiga Forests of Central Siberia Disturbed by Insect Pests” (no. FEFE-2024-0029) by the staff of the “Forest Ecosystems” scientific laboratory.

For citation: Vais A.A., Varaksin G.S., Mamedova S.K., Andronova A.A. Dynamics of Biometric and Carbon Indicators of Pine Plantations Growing on the Abandoned Farmlands of the Krasnoyarsk Forest-Steppe. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2024, no. 6, pp. 35–49. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-6-35-49>

Введение

В настоящее время серьезной проблемой является зарастание древесно-кустарниковой растительностью бывших аграрных земель, которые по большей части в конце 90-х гг. оказались невостребованными для ведения сельского хозяйства.

По мнению ряда авторов, процессы зарастания, лесовосстановления имеют разные скорость и цикличность [4, 8, 21–23]. Так, Е.А. Домнина с соавт. [8] на основе анализа спутниковых снимков установили, что зарастание постаграрных площадей проходит неоднородно (гетерогенно). Естественное возобновление на залежах малой площади одновременное, а на больших территориях – идет от стены леса, со временем постепенно удаляясь от нее. Признаки агрогенного воздействия на залежных землях сохраняются до 50 лет [19].

В исследовании процессов зарастания постаграрных земель большую роль играет учет сукцессионного развития растительности [5–7, 11, 14]. При

выращивании высокопродуктивных древесных насаждений на бывших сельскохозяйственных площадях необходимо принимать во внимание ряд факторов: эколого-лесоводственные особенности древесной породы, почвенные условия местопроизрастания [7]; площадь, густоту, возраст и запас фитомассы древесной растительности [14]. Таксационные показатели формирующихся древостоев зависят от удаленности материнского полога [11].

В процессе естественного лесовосстановления залежных земель необходимо уделять внимание сохранению и оценке состояния насаждений этих территорий [1, 10, 12, 17]. Значительную роль в таком мониторинге играют методы дистанционного зондирования [12]. При формировании насаждений на залежных землях существует высокая опасность патогенных заболеваний [10] и лесных пожаров [17].

По мере роста и развития насаждений на постаграрных территориях все острее становится проблема оценки продуктивности древостоев [1–3, 9, 25, 26]. Для сосновых молодняков залежных земель характерна высокая густота, которая определяет структуру всего древостоя. В связи с этим с целью повышения продуктивности чистых сосняков необходимо своевременно проводить рубки ухода [1]. По данным Л.В. Голубевой с соавт. [2], постаграрные сосновые насаждения, сформированные на залежах возрастом более 40 лет, интенсивно растут и имеют близкое к нативным насаждениям качество древесины.

Важную функцию залежные земли могут выполнять при реализации лесоклиматических проектов и обустройстве карбоновых ферм [18, 20, 24, 27]. А.А. Романовская с соавт. [20] отмечают, что общая площадь постаграрных земель в Российской Федерации составляет 21,6 млн га, при этом максимальная аккумуляция углерода наблюдается в центральных областях европейской части России, на юге Восточной Сибири и Дальнем Востоке. С точки зрения смягчения климатических изменений, по мнению ряда ученых, эффективны системы агролесоводства [31, 34]. При создании карбоновых ферм необходимо учитывать ряд факторов, которые актуальны для постаграрных земель: свойство территории, плодородие земли, фотосинтетический потенциал растений [16].

Анализ состояния вопроса позволяет констатировать, что временной фактор является доминирующим для процессов лесовосстановления, состояния и роста формирующихся на залежных землях насаждений. Исходя из этого, целью данного исследования стало изучение возрастных изменений (динамики) биометрических и углеродных показателей древостоев на таких землях.

Объекты и методы исследования

Проанализированы данные 8 постоянных пробных площадей (ПП), расположенных на залежах на границе ареала Красноярской лесостепи, в 2011 г. с повторным обмером в 2023 г. Учет временного фактора в процессе мониторинга бюджета углерода позволяет выявить ряд процессов динамики депонирования углерода, которые было бы невозможно пронаблюдать в случае однократного исследования. Общее представление о развитии насаждений дает их таксационное описание (табл. 1). Динамика процесса роста выявлена на 3 участках (ПП-1–3).

Таблица 1

Динамика таксационной характеристики насаждений на залежных участках (2011–2023 гг.)
 The dynamics of the inventory characteristics of forest plantations growing on the abandoned farmlands (2011–2023)

Участок	Год	Состав	Возраст, лет	Высота, м	Диаметр, см	Сумма площадей сечений, м ² /га	Число деревьев, шт./га	Бонитет	Тип леса	Расстояние от стены леса, м	Характер зрелости	Тип сукцессии												
													С _{млк}	С _{ртр}	С _{млк}	С _{ртр}	С _{вртр}	С _{ртр}						
ПП-1	2011	98С2Б	15	6,0	7,1	24,79	6182	III	С _{млк}	25–50	Сплошное	СС												
	2023	94С4Л2Б	27	8,8	8,8	50,37	8240																	
ПП-2	2011	93С7Б	15	4,2	4,8	17,00	9465	III	С _{млк}	50–55	Сплошное	СС												
	2023	94С4Л2Б	27	8,8	8,8	50,37	8240																	
ПП-3	2011	94С2Л2Е2Б	15	3,5	4,2	2,98	2154	IV	С _{вртр}	100–105	Биогруппа	СС												
	2023	96С2Л2Е	27	10,4	14,4	30,41	1880																	
ПП-4	2023	100С	27	7,9	14,7	21,06	1240	III	С _{ртр}	250	Биогруппа	СС												
ПП-5	2011	54С42Б4Ив	15	С–4,0 Б–5,0 Ив–3,2	С–4,3 Б–3,8 Ив–3,4	С–6,79 Б–4,14 Ив–0,27	С–4600 Б–3600 Ив–300	III	С _{ртр}	150	Сплошное	СМС												
													2011	80Б20Ив	10	6,3	Б–4,8 Ив–4,0	Б–6,66 Ив–1,13	Б–3700 Ив–900	I	Б _{кп}	180	Сплошное	ПС
2023	91Б9С	30	Б–7,8 С–4,4	12,3	Б–46,78 С–1,52	Б–9833 С–1000	III	Б _{ртр}	200	Сплошное	БС													

Примечание: С_{млк}, С_{ртр}, С_{вртр} – мертвопокровный, разновысотный и вынужденно-разнотравный сосняки соответственно; Б_{кп}, Б_{ртр} – кипрейный и разновысотный березняки соответственно; Ос_{ртр} – разновысотный осинник; СС, СМС, ПС, ОС, БС – сосновая, смешанная, пирогенная, березовая, осинная и березовая сукцессии соответственно.

В основу исследований как в 2011 г., так и в 2023 г. положены методика ленточного перечета и измерение основных морфологических показателей учетных растущих деревьев по ступеням толщины. Кроме этого, на каждой из 3 пробных площадей отобраны по 3 модельных дерева для оценки фитомассы отдельных фракций в соответствии с общепринятой методикой [15].

С использованием данных измерений модельных деревьев по ступеням толщины выполнен статистический анализ с оценкой точечных периодических средних арифметических показателей, характеризующих динамику растущих деревьев (табл. 2).

$$ДТО_{\Delta} = \frac{БП_A}{БП_{A-n}},$$

где $БП_A$, $БП_{A-n}$ – средние биометрические показатели деревьев текущего возраста и деревьев n лет назад.

Таблица 2

Средняя периодическая динамика морфологических показателей модельных деревьев сосны (2011–2023 гг.)
The average periodic dynamics of the morphological parameters of model pine trees (2011–2023)

Уча- сток	Год	Диаметр, см	Высота			Диаметр кроны, м	
			деревя, м	начала кроны, м	максимально- го диаметра кроны, м	С–Ю	З–В
ПП-1	2011	8,0±0,90	6,4±0,33	2,8±0,16	3,8±0,26	2,5±0,38	2,5±0,39
	2023	9,2±1,21	8,4±0,63	3,4±0,32	5,7±0,50	2,4±0,21	2,6±0,26
	Дина- мика	1,15	1,31	1,21	1,50	0,96	1,04
ПП-2	2011	5,1±0,67	3,9±0,18	1,6±0,15	2,2±0,18	1,7±0,13	2,0±0,20
	2023	10,7±1,49	9,6±0,70	4,9±0,43	6,7±0,61	3,5±1,02	2,5±0,21
	Дина- мика	2,10	2,46	3,06	3,05	2,06	1,25
ПП-3	2011	4,4±0,53	3,3±0,29	0,3±0,03	1,2±0,13	1,3±0,08	1,2±0,07
	2023	12,3±1,22	9,8±0,41	3,5±0,32	6,9±0,32	2,8±0,28	2,7±0,26
	Дина- мика	2,80	2,97	11,67	5,75	2,15	2,25

Примечание: Оценка выполнена при уровне доверительной вероятности 95,4 %. Все значения статистики достоверны по критерию Стьюдента, поскольку $t_{\phi} > t_{\text{табл}}$.

Изменения высот деревьев по диаметрам устанавливались на основе регрессионного анализа с применением 2-параметрического нелинейного уравнения:

$$H = 1,3 + \left(\frac{d}{a + bd} \right)^3,$$

где H – высота дерева, м; d – диаметр дерева на высоте 1,3 м, см; a , b – коэффициенты уравнения.

Выбор метода обусловлен исследованиями А.В. Лебедева [13], который считает, что из метода множества функций, отражающих связь высот и диаметров, наибольшее распространение получила функция Näslund. Обработка материала выполнялась в программах Excel и Statgraphics с использованием процедур статистического и нелинейного анализа.

Результаты исследования и их обсуждение

Данные о динамике процесса зарастания и развития насаждений (2011–2023 гг.) показали, что по мере формирования залежей кроме доминирующих сосны (*Pinus sylvestris* L.), березы (*Betula pendula* Roth), осины (*Populus tremula* L.) присутствуют лиственница (*Larix sibirica* Ledeb.), ель (*Picea obovata* Ledeb.) и ива (*Salix caprea* L.). Можно констатировать, что в процессе зарастания формируются как чистые сосновые, так и смешанные насаждения, различные по составу и происхождению. Древостои имели возраст с 10 до 30 лет. На участках с фиксированием изменений показателей в 2011 г. насаждения характеризовались возрастом 15 лет, а в 2023 г. – 27 лет.

На пробных участках наблюдались различные процессы изменения густоты залежей (зарастание, изреживание). На ПП-1 густота возросла (процесс зарастания), что выразилось в незначительном увеличении средних высоты (6,0–8,8 м) и диаметра (7,1–8,8 см). При этом сумма площадей поперечного сечения увеличилась более чем в 2 раза (24,79–50,37 м²/га). На ПП-2, 3 наблюдалось снижение густоты (изреживание). На ПП-2 при достаточно высокой густоте (8240–9465 шт./га) абсолютная полнота возросла за 12 лет почти в 3 раза (17,00–50,37 м²/га). На ПП-3 при низкой густоте (1880–2154 шт./га) сумма площадей сечений деревьев увеличилась более чем в 15 раз (2,98–30,41 м²/га), но при этом не достигла максимума (50,37 м²/га).

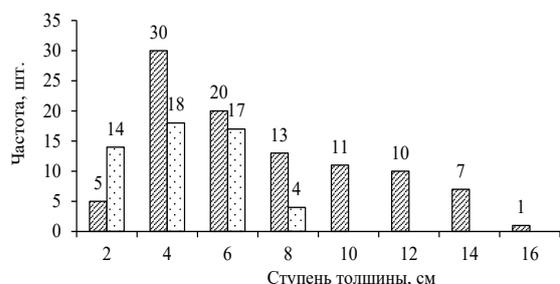
Сосняки характеризуются III классом бонитета. При небольшой густоте и протекании процесса изреживания молодняки могут достигать II класса бонитета. Лиственные древостои (березняки) на залежах с благоприятными условиями произрастания соответствуют I классу бонитета.

Типологическая структура менялась от мертвопокровных или вейниково-разнотравных сосняков до разнотравных. Процесс зарастания залежей происходит от стены леса и при расстоянии до 50 м продолжается после 30 лет. Для залежей характерны все формы зарастания: куртинная, биогруппами, сплошная, одиночные деревья.

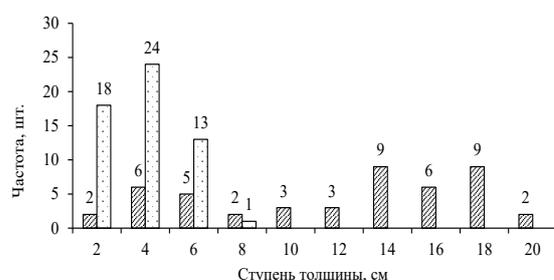
Эндогенные и экзогенные условия оказывают влияние на морфологическую структуру молодняков.

Средняя количественная оценка показывает наиболее интенсивные изменения высоты, диаметра, высоты начала кроны, высоты максимального диаметра кроны и диаметров крон на ПП-3, где наблюдалась минимальная густота, которая в динамике уменьшалась. На ПП-2 густота являлась максимальной со снижением в динамике, при этом морфологические показатели характеризовались средним приростом. Минимальные изменения зафиксированы на ПП-1, где густота значительно возросла за 12 лет. Средние показатели достоверны по критерию Стьюдента.

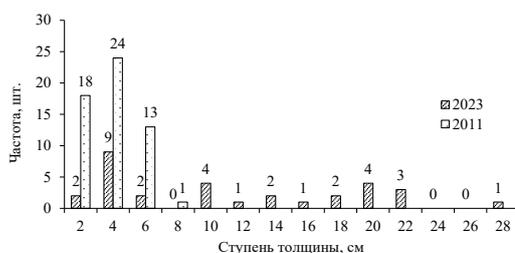
Визуальное изменение распределения деревьев по ступеням толщины представлено на рис. 1. Видно, что ряды становятся более растянутыми с началом формирования деревьев следующего поколения (ПП-2, 3). В результате даже в условиях снижения густоты в окнах полога продолжается зарастание.



а



б



в

Рис. 1. Динамика структуры сосновых молодняков по ступеням толщины (2011–2023 гг.): а – ПП-1; б – ПП-2; в – ПП-3

Fig. 1. The dynamics of the structure of young pine stands by diameter class (2011–2023): а – SP-1; б – SP-2; в – SP-3

Интересным с точки зрения оценки динамики зарастания является изучение заранее известной закономерности в соотношении высот и диаметров деревьев. В последние годы получили распространение смешанные модели [28–30, 32, 33].

Оценка динамики роста на основе линий регрессий выполнялась с учетом классических математических моделей, используемых для визуализации диаграмм высот. На рис. 2 изображены линии соотношения высот и диаметров в разные временные отрезки (2011 и 2023 гг.).

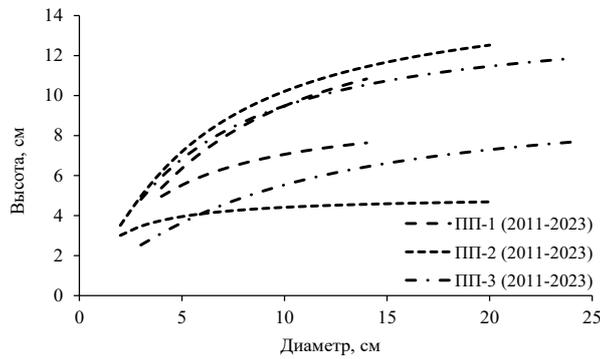


Рис. 2. Соотношение высот и диаметров деревьев сосны в условиях залежей (2011–2023 гг.)

Fig. 2. The ratio of heights to diameters of pine trees growing on the abandoned farmlands (2011–2023)

В табл. 3 представлены теоретические и эмпирические модели, демонстрирующие на основе данных о диаметрах рост высот деревьев сосны на залежных землях за период 2011–2023 гг.

Таблица 3

Регрессионные уравнения высот сосны и их оценка с учетом диаметров деревьев и года наблюдений

The regression equations of pine tree heights and their estimation in relation to the diameters of the trees and the year of observation

Участок	Год	Эмпирическое уравнение	R ²	m	K _{д-у}	K _а
ПП-1	2011	$H = 1,3 + (d/(0,608 + 0,497d))^3$	77,6	0,4	1,1	Слабая
	2023	$H = 1,3 + (d/(0,863 + 0,410d))^3$	93,0	0,5	2,6	
ПП-2	2011	$H = 1,3 + (d/(0,378 + 0,647d))^3$	57,3	0,3	1,0	Умеренная
	2023	$H = 1,3 + (d/(0,713 + 0,411d))^3$	88,7	0,7	2,8	
ПП-3	2011	$H = 1,3 + (d/(1,350 + 0,483d))^3$	88,8	0,3	2,1	Слабая
	2023	$H = 1,3 + (d/(0,693 + 0,427d))^3$	80,3	0,6	2,5	

Примечание: R² – коэффициент детерминации, %; m – основная ошибка, м; K_{д-у} – коэффициент Дарбина–Уотсона; K_а – коэффициент автокорреляции. Коэффициенты уравнений значимы, поскольку $p < 0,05$. Параметры уравнений получены с использованием метода итерации.

Коэффициент детерминации уравнений менялся от 57,3 до 99,0 %, т. е. их адекватность достаточно высокая – >50 %. Основная ошибка не превысила 0,7 м. Коэффициент Дарбина–Уотсона – 1,0–2,8; это говорит о положительной автокорреляции. Связь между высотами ряда слабо-умеренная и не указывает на влияние отдельного фактора.

Следует отметить, что при максимальной густоте (ПП-2) в 2011 г. наблюдается элиминация деревьев старших рангов.

Во всех случаях высота деревьев одного диаметра в 2023 г. больше, чем в 2011 г. (для ПП-1 разница 2,5 м; для ПП-2 – 2,8 м; для ПП-3 – 2,2–4,0 м). При этом только на ПП-1 наблюдалось увеличение густоты, на ПП-2, 3 плотность

снижалась при интенсивном росте абсолютной полноты. Возможно, сказался замедленный рост одиночных деревьев на первичном этапе развития сосняков. Таким образом, с определенной долей вероятности можно утверждать, что на рост молодняков оказывают значимое влияние и внешние факторы, в т. ч. климатические изменения.

Для оценки углеродной продуктивности сосновых молодняков выполнен подеревный расчет углерода для всей надземной биомассы дерева в килограммах абсолютно сухого веса. С этой целью использовались регрессионные модели, представленные в «Методике количественного определения объема поглощений парниковых газов», утвержденной приказом Минприроды России от 27 мая 2022 г. № 371. В общем виде эмпирическое уравнение для деревьев сосны выглядит так:

$$C_1 = 0,5 \sum (0,0217d^2H)^{0,9817},$$

где 0,5 – коэффициент пересчета биомассы в углеродные единицы.

Второе уравнение получено для сосновых молодняков, произрастающих на залежных землях на границе Красноярской лесостепи (II разряд продуктивности):

$$C_2 = 0,5 \cdot 0,377 \sum (0,309d)^{2,281}.$$

Результаты расчетов представлены в табл. 4.

Таблица 4

Динамика углеродной продуктивности сосновых молодняков залежи (2011–2023 гг.)
The dynamics of carbon productivity of young pine stands growing on the abandoned farmlands (2011–2023)

Участок	Год	Расстояние от стены леса, м	Углеродная продуктивность сосняков, тС · га ⁻¹		
			C ₁	C ₂	Разница, %
ПП-1	2011	25–55	20,22	33,43	+65,3
	2023		34,36	43,35	+26,2
	<i>Прирост, %</i>		+69,9	+29,7	–
ПП-2	2011		8,88	21,21	+138,5
ПП-3	2011	100–105*	1,27	3,58	+181,9
	2023		25,61	31,89	+24,5
	<i>Прирост, %</i>		+1916,5	+790,8	–

*Биогруппа с последующим зарастанием.

Данные показывают, что использование регрессионных уравнений, отражающих местные условия произрастания, позволяет более точно оценить продуктивность конкретного участка. Во всех случаях эмпирическое уравнение для расчета C₁ в значительной степени занижает оценку углеродной продуктивности сосновых молодняков. Фактическое депонирование углерода за период 2011–2023 гг. возросло на ПП-1 в 1,3 раза, а на ПП-3 – в 8,9 раза. На ПП-3 первоначально (2011 г.) деревья росли биогруппами, в 2023 г. выявлено сплошное зарастание, что и объясняет такой интенсивный рост.

Выводы

1. Состав чистых сосновых молодняков на залежах с годами практически не меняется, появляются в небольшом количестве деревья лиственницы. Древоостой достаточно разнообразен по составу и происхождению.

2. Динамика густоты молодняков разнонаправлена в зависимости от конкретных условий (изреживание перегушенных участков; сплошное зарастание участков с биогруппами).

3. Вне зависимости от густоты молодняки за 12 лет в значительной степени увеличили абсолютную полноту (в 3–15 раз), что говорит о перспективности использования данных площадей с целью реализации лесоклиматических проектов.

4. Процесс зарастания залежей продолжается, на что указывает анализ динамики строения молодняков по диаметру.

5. Интенсивность роста деревьев одного диаметра в высоту больше в 2023 г. в сравнении с 2011 г. Возможно, на это оказывает влияние комплекс внешних и внутренних факторов, в т. ч. климатические изменения.

6. Использование регрессионных нелинейных моделей позволяет определить приростные высоты с учетом диаметров и временных изменений в росте деревьев.

7. Средняя количественная оценка показала, что наиболее интенсивные изменения высоты, диаметра, высоты начала кроны, высоты максимального диаметра кроны и диаметров крон произошли на пробной площади, где наблюдалась минимальная густота, которая в динамике уменьшалась.

8. Для определения углеродной продуктивности древостоев залежей целесообразно применять местные регрессионные уравнения, которые позволяют более точно оценить интенсивность депонирования углерода в сравнении с общероссийской методикой.

9. Исследование динамики депонирования углерода молодняками на залежных землях указывает на целесообразность использования постаграрных земель для реализации лесоклиматических проектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Березин А.А., Савиных Н.П. Постагрогенные сосняки в средней тайге (на примере Кировской области) // Сохранение лесных экосистем: проблемы и пути их решения: материалы II Междунар. науч.-практ. конф. Киров: ВятГУ, 2019. С. 17–22.

Berezin A.A., Savinykh N.P. Postagrogenic Pine Forests in the Middle Taiga (Case Study of Kirov Oblast). *Conservation of Forest Ecosystems: Problems and Ways to Solve Them: Materials of the II International Scientific and Practical Conference*. Kirov, Vyatka State University, 2019, pp. 17–22. (In Russ.).

2. Голубева Л.В., Наквасина Е.Н., Минин Н.С. Продуктивность и качество древесины сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в постагрогенных насаждениях // Изв. С.-Петерб. лесотехн. акад. 2016. Вып. 215. С. 19–29.

Golubeva L.V., Nakvasina E.N., Minin N.S. Productivity and Wood Quality of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) in Postagrogenic Plantations. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj lesotekhnicheskoy akademii*, 2016, iss. 215, pp. 19–29. (In Russ.). <https://doi.org/10.21266/2079-4304.2016.215.19-29>

3. Грибов С.Е., Корчагов С.А., Хамитов Р.С., Евдокимов И.В. Производительность древостоев, сформировавшихся на землях сельскохозяйственного назначения // Лесн. вестн. / Forestry Bulletin. 2020. Т. 24, № 6. С. 19–25.

Gribov S.E., Korchagov S.A., Khamitov R.S., Evdokimov I.V. Productivity of Stands Formed on Agricultural Lands. *Lesnoy vestnik = Forestry Bulletin*, 2020, vol. 24, no. 6, pp. 19–25. (In Russ.). <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2020-6-19-25>

4. Данилов Д.А., Богданова Л.С., Мандрыкин С.С., Яковлев А.А., Сергеева А.С. Влияние плодородия почвы на естественное возобновление леса на старопахотных землях // Изв. С.-Петерб. лесотехн. акад. 2019. Вып. 229. С. 145–163.

Danilov D.A., Bogdanova L.S., Mandrykin S.S., Yakovlev A.A., Sergeyeva A.S. Influence of Soil Fertility on the Natural Restoration of Forest on Old Agricultural Lands. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj lesotekhnichesskoj akademii*, 2019, iss. 229, pp. 145–163. (In Russ.).

5. Данилов Д.А., Жигунов А.В., Рябинин Б.Н., Вайман А.А. Оценка состояния лесных и постагрогенных почв Ленинградской области и перспективы интенсивного лесовыращивания на этих территориях // Изв. С.-Петерб. лесотехн. акад. 2018. Вып. 223. С. 47–63.

Danilov D.A., Zhigunov A.V., Ryabinin B.N., Vaiman A.A. Assessment of the Condition of Forest and Postagrogenic Soils of the Leningrad Region and Prospects of Intensive Forest Growth in These Areas. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj lesotekhnichesskoj akademii*, 2018, iss. 223, pp. 47–63. (In Russ.).

6. Данилов Д.А., Зайцев Д.А., Януш С.Ю., Вайман А.А. Проблематика использования постагрогенных земель для выращивания древесных насаждений // Леса России: политика, промышленность, наука, образование: материалы VI Всерос. науч.-техн. конф. СПб.: СПбГЛТУ, 2021. Т. 1. С. 143–146.

Danilov D.A., Zaitsev D.A., Yanush S.Yu., Vaiman A.A. Problems of Using Postagrogenic Lands for Growing Forest Stands. *Forests of Russia: Politics, Industry, Science, Education: Materials of the VI All-Russian Scientific and Technical Conference*. St. Petersburg, Saint Petersburg State Forest Technical University, 2021, vol. 1, pp. 143–146. (In Russ.).

7. Данилов Д.А., Рябинин Б.Н., Януш С.Ю. Создание насаждений сосны и ели на залежных землях Северо-Запада России // Междунар. журн. гуманит. и естеств. наук. 2018. № 7. С. 106–110.

Danilov D.A., Ryabinin B.N., Janusz S.Yu. Creation of Pine and Farming Plants on Deployable Land North-West of Russia. *Mezhdunarodnyj zhurnal gumanitarnykh i estestvennykh nauk = International Journal of Humanities and Natural Sciences*, 2018, no. 7, pp. 106–110. (In Russ.).

8. Домнина Е.А., Адамович Т.А., Тимонов А.С., Ашихмина Т.Я. Мониторинг зарастания заброшенных земель сельскохозяйственного назначения по спутниковым снимкам высокого разрешения // Теорет. и приклад. экология. 2022. № 3. С. 82–89.

Domnina E.A., Adamovich T.A., Timonov A.S., Ashikhmina T.Ya. Monitoring of Overgrowing of Abandoned Agricultural Lands Using High-Resolution Satellite Images. *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya = Theoretical and Applied Ecology*, 2022, no. 3, pp. 82–89. (In Russ.). <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2022-3-082-089>

9. Жигунов А.В., Данилов Д.А., Красновидов А.Н., Эндерс О.О. Создание высокопродуктивных лесонасаждений на землях, вышедших из активного сельскохозяйственного оборота // Вестн. Башкир. гос. аграр. ун-та. 2014. № 3(31). С. 85–90.

Zhigunov A., Danilov D., Krasnovidov A., Enders O. Creation of Highly Productive Plantations on Lands Withdrawn from Active Agriculture. *Vestnik Bashkirskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = Vestnik Bashkir State Agrarian University*, 2014, no. 3(31), pp. 85–90. (In Russ.).

10. Залесов С.В., Жижин С.М., Магасумова А.Г., Оплетев А.С., Платонов Е.П. Повышение эффективности использования бывших сельскохозяйственных угодий // Изв. С.-Петерб. лесотехн. акад. 2022. Вып. 239. С. 104–116.

Zalesov S.V., Zhizhin S.M., Magasumova A.G., Opletaev A.S., Platonov E.P. Increasing the Efficiency of Former Agricultural Land Using. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj lesotekhnichesskoj akademii*, 2022, iss. 239, pp. 104–116. (In Russ.).

11. Карпин В.А., Петров Н.В., Туунен А.В. Восстановление лесных фитоценозов после различных видов сельскохозяйственного использования земель в условиях среднетаежной подзоны // Сиб. лесн. журн. 2017. № 6. С. 120–129.

Karpin V.A., Petrov N.V., Tuunen A.V. Regeneration of Forest Phytocoenoses after Various Agricultural Land Use Practices in the Conditions of Middle Taiga Subzone. *Sibirskij lesnoj zhurnal* = Siberian Journal of Forest Science, 2017, no. 6, pp. 120–129. (In Russ.). <https://doi.org/10.15372/SJFS20170610>

12. Курбанов Э.А., Нуреева Т.В., Воробьев О.Н., Губаев А.В., Лежнин С.А., Мифтахов Т.Ф., Незамаев С.А., Полевщикова Ю.А. Дистанционный мониторинг динамики нарушений лесного покрова, лесовозобновления и лесовосстановления в Марийском Заволжье // Вестн. Марийск. гос. техн. ун-та. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2011. № 3. С. 17–24.

Kurbanov E.A., Nureeva T.V., Vorobyev O.N., Gubayev A.V., Lezhnin S.A., Miftakhov T.F., Nezamayev S.A., Polevshikova Y.A. Remote Monitoring of Disturbances in Forest Cover, Reforestation and Afforestation of Mari Zavolzhje. *Vestnik Marijskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya "Les. Ekologiya. Prirodopol'zovanie"* = Vestnik of the Mari State University. Series "Forest. Ecology. Nature Management", 2011, no. 3, pp. 17–24. (In Russ.).

13. Лебедев А.В., Кузьмичев В.В. Проверка двухпараметрических моделей зависимости высоты от диаметра на высоте груди в березовых древостоях // Изв. С.-Петерб. лесотехн. акад. 2020. Вып. 230. С. 100–113.

Lebedev A.V., Kuzmichev V.V. Verification of Bi-Parameter Models of Dependence Diameter on Breast Height in Birch Stands. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj lesotekhnicheskoy akademii*, 2020, iss. 230, pp. 100–113. (In Russ.).

14. Лежнин С.А., Музурова Р.Л. Оценка вторичной сукцессии на залежах Республики Марий Эл // Лесн. экосистемы в условиях изменения климата: биол. продуктивность и дистанц. мониторинг. 2019. № 5. С. 126–135.

Lezhnin S.A., Muzurova R.L. Estimation of Secondary Succession on the Abandoned Agricultural Lands in Mari El Republic. *Lesnye ekosistemy v usloviyakh izmeneniya klimata: biologicheskaya produktivnost' i distantsionnyj monitoring* = Forest Ecosystems under Climate Change: Biological Productivity and Remote Monitoring, 2019, no. 5, pp. 126–135. (In Russ.). <https://doi.org/10.25686/6785.2019.5.58823>

15. Лукина Н.В., Данилова М.А., Иванова Е.А. Методические рекомендации по отбору и камеральной обработке растительных образцов для оценки динамики запасов углерода в лесных, степных и тундровых экосистемах в части разработки системы наземного и дистанционного мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов на территории Российской Федерации, создания системы учета данных о потоках климатически активных веществ и бюджете углерода в лесах и других наземных экологических системах. Версия 2023-1. М., 2023. 27 с.

Lukina N.V., Danilova M.A., Ivanova E.A. *Guidelines for the Selection and Laboratory Processing of Plant Samples to Assess the Dynamics of Carbon Stocks in Forest, Steppe and Tundra Ecosystems in Terms of Developing a System for Ground-Based and Remote Monitoring of Carbon Pools and Greenhouse Gas Flows in the Russian Federation, Creating a System for Recording Data on Flows of Climate-Active Substances and Carbon Budget in Forests and Other Terrestrial Ecological Systems: Version 2023-1*. Moscow, 2023. 27 p. (In Russ.).

16. Малыш Е.В. Ренты карбоновых ферм на землях сельскохозяйственного назначения // Регион. проблемы преобразования экономики. 2021. № 10. С. 58–65.

Malysh E.V. Rents of Carbon Farms on Agricultural Land. *Regional'nye problemy preobrazovaniya ekonomiki* = Regional Problems of Transforming the Economy, 2021, no. 10, pp. 58–65. (In Russ.). <https://doi.org/10.26726/1812-7096-2021-10-58-65>

17. Морозов А.С., Иванова Г.А., Бакшеева Е.О., Иванов В.А. Пожароопасность сосновых молодняков на неиспользуемых сельскохозяйственных землях // Сиб. лесн. журн. 2020. № 3. С. 26–36.

Morozov A.S., Ivanova G.A., Baksheeva E.O., Ivanov V.A. Fire Hazard of Young Pine Stands on Unused Agricultural Lands. *Sibirskij lesnoj zhurnal* = Siberian Journal of Forest Science, 2020, no. 3, pp. 26–36. (In Russ.). <https://doi.org/10.15372/SJFS20200303>

18. Наквасина Е.Н., Шумилова Ю.Н. Динамика запасов углерода при формировании лесов на постагрогенных землях // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 1. С. 46–59.

Nakvasina E.N., Shumilova Yu.N. Dynamics of Carbon Stocks in the Formation of Forests on Post-Agrogenic Lands. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2021, no. 1, pp. 46–59. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2021-1-46-59>

19. Пономарева Т.В., Пономарёв Е.И., Шишикин А.С., Швецов Е.Г. Мониторинг трансформации старопахотных почв лесостепной зоны при лесовосстановлении // География и природ. ресурсы. 2018. № 2. С. 154–161.

Ponomareva T.V., Ponomarev E.I., Shishikin A.S., Shvetsov E.G. Monitoring of Transformation of Postagrogenic Soils in Forest-Steppe Zone during the Process of Reforestation. *Geografiya i prirodnye resursy* = Geography and Natural Resources, 2018, no. 2, pp. 154–161. (In Russ.).

20. Романовская А.А., Гитарский М.Л., Карабань Р.Т., Назаров И.М. Роль залежных земель России в поглощении диоксида углерода из атмосферы // Проблемы экол. мониторинга и моделирования экосистем. 2005. Т. 20. С. 219–237.

Romanovskaya A.A., Ginarskiy M.L., Karaban' R.T., Nazarov I.M. The Role of Abandoned Farmlands in Russia in the Absorption of Carbon Dioxide from the Atmosphere. *Problemy ekologicheskogo monitoringa i modelirovaniya ekosistem*, 2005, vol. 20, pp. 219–237. (In Russ.).

21. Терехин Э.А. Особенности лесовозобновления на залежных землях Среднерусской лесостепи // Изв. Рос. акад. наук. Сер.: Геогр. 2022. Т. 86, № 4. С. 594–604.

Terekhin E.A. Reforestation on Abandoned Agricultural Lands in the Central-Russian Forest-Steppe. *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya*, 2022, vol. 86, no. 4, pp. 594–604. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S2587556622040112>

22. Терехин Э.А. Процессы лесовозобновления на залежах юго-запада Среднерусской возвышенности // Лесн. экосистемы в условиях изменения климата: биол. продуктивность и дистанц. мониторинг. 2016. № 2. С. 57–62.

Terekhin E.A. Reforestation on Abandoned Lands Southwest of Central Russian Upland. *Lesnye ekosistemy v usloviyakh izmeneniya klimata: biologicheskaya produktivnost' i distantsionnyj monitoring* = Forest Ecosystems under Climate Change: Biological Productivity and Remote Monitoring, 2016, no. 2, pp. 57–62. (In Russ.).

23. Терехин Э.А. Состояние залежных земель и особенности их спектрально-отражательных свойств на территории Среднерусской лесостепи // Регион. геосистемы. 2022. Т. 46, № 3. С. 356–365.

Terekhin E.A. Parameters of Abandoned Agricultural Lands and Their Reflectance in the Central Russian Forest-Steppe. *Regional'nye ekosistemy* = Regional Geosystems, 2022, vol. 46, no. 3, pp. 356–365. (In Russ.). <https://doi.org/10.52575/2712-7443-2022-46-3-356-365>

24. Чернова О.В., Рыжова И.М., Подвезенная М.А. Изменение величины и структуры углерода в регионах южной тайги и лесостепи Европейской России за исторический период // Живые и биокос. системы. 2017. № 19. Ст. № 2. Режим доступа: <https://jbks.ru/assets/files/content/2017/issue19/article-2.pdf> (дата обращения: 17.10.24).

Chernova O.V., Ryzhova I.M., Podvezennaya M.A. Changes of Organic Carbon Pools in the Southern Taiga and Forest-Steppe of European Russia during the Historical Period. *Zhivye i biokosnye sistemy* = Live and Bio-Abiotic Systems, 2017, no. 19, art. no. 2. (In Russ.).

25. Янбаев Ю.А., Тагиров В.В., Бахтина С.Ю., Тагирова А.А. Динамика роста подроста сосны обыкновенной на неосваиваемых землях // Изв. Оренбург. гос. аграр. ун-та. 2018. № 4(72). С. 150–151.

Yanbaev Yu.A., Tagirov V.V., Bakhtina S.Yu., Tagirova A.A. The Dynamics of Scots Pine Undergrowth Development on Abandoned Lands. *Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = *Izvestia Orenburg State Agrarian University*, 2018, no. 4(72), pp. 150–151. (In Russ.).

26. Януш С.Ю., Данилов Д.А., Красновидов А.Н., Иванов А.А. Фитомасса 10-летних насаждений сосны на залежных землях Ленинградской области // Актуал. проблемы лесного комплекса. 2018. № 53. С. 55–57.

Yanush S.Yu., Danilov D.A., Krasnovidov A.N., Ivanov A.A. Phytomass of 10 Year Old Trees Pine on Unused Agricultural Land Leningrad Region. *Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa*, 2018, no. 53, pp. 55–57. (In Russ.).

27. Belay B., Pötzelsberger E., Sisay K., Assefa D., Hasenauer H. The Carbon Dynamics of Dry Tropical Afromontane Forest Ecosystems in the Amhara Region of Ethiopia. *Forests*, 2018, vol. 9, no. 1, art. no. 18. <https://doi.org/10.3390/f9010018>

28. Camacho E.A.R., Rivas S.C., Hernández J.A.L., Duran A.A.C., Carmona J.X., Nagel J. Generalized Height-Diameter Models with Random Effects for Natural Forests of Central Mexico. *CERNE*, 2022, vol. 28, art. no. e-103033. <https://doi.org/10.1590/01047760202228013033>

29. Feraz Filho A.C., Mola-Yudego B., Ribeiro A., Scolforo J.R.S., Loos R.A., Scolforo H.F. Height-Diameter Models for *Eucalyptus* sp. Plantations in Brazil. *CERNE*, 2018, vol. 24, no. 1, pp. 9–17. <https://doi.org/10.1590/01047760201824012466>

30. Hofiço N.S.A., Costa E.A., Fleig F.D., Finger C.A.G., Hess A.F. Height-Diameter Relationships for *Eucalyptus grandis* Hill Ex. Maiden in Mozambique: Using Mixed-Effects Modeling Approach. *CERNE*, 2020, vol. 26, no. 2, pp. 183–192. <https://doi.org/10.1590/01047760202026022677>

31. Lutter R., Stål G., Arnesson Ceder L., Lim H., Padari A., Tullus H., Nordin A., Lundmark T. Climate Benefit of Different Tree Species on Former Agricultural Land in Northern Europe. *Forests*, 2021, vol. 12, no. 12, art. no. 1810. <https://doi.org/10.3390/f12121810>

32. Ogana F.N., Corral-Rivas S., Gorgoso-Varela J.J. Nonlinear Mixed-Effect Height-Diameter Model for *Pinus pinaster* Ait. and *Pinus radiata* D. Don. *CERNE*, 2020, vol. 26, no. 1, pp. 150–161. <https://doi.org/10.1590/01047760202026012695>

33. Salas-Eljatib C., Corvalán P., Pino N., Donoso P. J., Soto D.P. Modelos de Efectos Mixtos de Altura-Diámetro para *Drimys Winteri* en el Sur (41-43° S) de Chile = Mixed-Effects Height-Diameter Models for *Drimys winteri* in the South (41-43° S) of Chile. *BOSQUE (Valdivia)*, 2019, vol. 40, no. 1, pp. 71–80. (In Span.). <https://doi.org/10.4067/S0717-92002019000100071>

34. Xie X., Cui J., Shi W., Liu X., Tao X., Wang Q., Xu X. Biomass Partition and Carbon Storage of *Cunninghamia lanceolata* Chronosequence Plantations in Dabie Mountains in East China. *Dendrobiology*, 2016, vol. 76, pp. 165–174. <http://dx.doi.org/10.12657/denbio.076.016>

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

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