

ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЕ СТАТЬИ

УДК 630*562.2:631.841.7:571.51

СПЕЦИФИКА ПРИРОСТА РАЗНОГУСТОТНЫХ СОСНОВЫХ МОЛОДНЯКОВ КРАСНОЯРСКОЙ ЛЕСОСТЕПИ В КОНТЕКСТЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ АССИМИЛЯЦИОННОГО АППАРАТА

А. А. Онучин, В. Е. Арясов, А. М. Шемберг

*Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН – обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН
660036, Красноярск, Академгородок, 50/28*

E-mail: onuchin@ksc.krasn.ru, Vova_aryasov@mail.ru, Antonschemberg@gmail.com

Поступила в редакцию 20.05.2024 г.

Проведены синхронные наблюдения за динамикой прироста древесины и хвои сосновых молодняков 22-летнего возраста на бывших сельскохозяйственных угодьях в Красноярской лесостепи. Установлено, что в перегушенных древостоях (с начальной густотой 40.7 тыс. шт./га) максимальный прирост древесины происходит в возрасте 15 лет, после чего наблюдается устойчивое его снижение. Насаждения с начальной густотой 10.8 тыс. шт./га, а также со сниженной в результате рубок ухода в 8-летнем возрасте до 2.9 тыс. шт./га демонстрируют продолжающееся увеличение прироста древесины в течение всего периода наблюдений. При этом в варианте с рубками ухода в возрасте 18 лет наблюдаются стабилизация и некоторое снижение прироста массы хвои, тогда как насаждения, не пройденные рубками ухода, независимо от начальной густоты сохраняют тенденцию увеличения прироста массы хвои. Кажущийся парадокс снижения в определенном возрасте прироста древесины с одновременным сохранением тенденции увеличения прироста хвои в перегушенном молодняке и снижение прироста хвои с одновременным сохранением тенденции увеличения прироста древесины в насаждении, пройденном рубками ухода, объясняется повышением эффективности работы ассимиляционного аппарата в условиях низкой конкуренции за ресурсы среды. Данный факт подтвержден специальными исследованиями эффективности фотосинтеза хвои в перегушенных сосняках и насаждениях, где деревья продуцируют в условиях, приближенных к свободному росту. Полученные результаты могут быть полезны при выращивании насаждений различного целевого назначения.

Ключевые слова: *сосновые молодняки, рубки ухода, густота древостоев, прирост хвои, прирост древесины, депонирование углерода, фотосинтез.*

DOI: 10.15372/SJFS20240503

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность изучения закономерностей формирования сосновых древостоев обусловлена как их важным ресурсным значением, так и возрастающей ролью прочих экосистемных услуг в рамках ведения лесного хозяйства, что подразумевает жизненно важной для лесной отрасли России парадигмой устойчивого управления лесами. К числу экосистемных услуг отно-

сится и способность лесов депонировать атмосферный углерод, что способствует смягчению последствий изменения климата. Очевидно, что при оценке углерод депонирующей способности лесов необходимо принимать во внимание специфику накопления и деструкции органической массы различных частей деревьев. Такая специфика и будет определять особенности циклов углерода в насаждениях различного возраста и структуры, которая может формироваться по-

средством лесохозяйственных мероприятий, предусмотренных соответствующей системой управления лесами.

Известно, что формирование органического вещества растений происходит посредством фотосинтеза и поэтому изучение функций ассимиляционного аппарата может рассматриваться в качестве фундаментальной основы познания специфики роста древостоев. Знание закономерностей формирования древостоев в связи со спецификой их структуры позволит снизить риски принятия решений в части адаптивного лесосоуправления с одновременным обеспечением принципа дополнительности при реализации лесоклиматических проектов. Одной из разновидностей лесоклиматических проектов являются так называемые карбоновые фермы, ставящие основной целью увеличение депонирования атмосферного CO₂. В последнем случае весьма актуально знание не только прироста древесины, но и остальных компонентов фитомассы, включая хвою (листву).

Корректная оценка специфики прироста общей фитомассы и поглощения CO₂ имеет не только важное теоретическое, но и практическое значение, если вопрос касается торговли углеродными квотами, в том числе при реализации проектов по созданию карбоновых ферм (Онучин, Данилин, 2023).

Известно, что лесохозяйственные мероприятия посредством регулирования численности деревьев в древостое способны обеспечить густотно-возрастные оптимумы продуктивности, увеличить прирост древесины и депонирование углерода (Онучин и др., 2011; Разин, 2012).

Стартовые условия роста древостоев во многом определяют их дальнейшее развитие. Сосновые молодняки с высокой начальной густотой отличаются интенсивным приростом по сравнению с редкостойными насаждениями. Однако по мере роста и усиления внутривидовой конкуренции происходят элиминация оставших в росте экземпляров и снижение общего прироста древостоев, тогда как насаждения, деревья в которых развиваются в условиях, приближенных к свободному росту, продолжают увеличивать прирост, обгоняя по этому показателю таковые с большей начальной густотой (Бузыкин, Пшеничникова, 1999). Отсюда лесохозяйственные мероприятия, регулирующие структуру древостоев и определяющие траектории их дальнейшего роста наиболее целесообразно реализовать на ранних этапах формирования насаждений

(Рогозин, 2024). Рубки ухода позволяют регулировать доступность ресурсов среды для отдельных деревьев и определяют их физиологическую реакцию на изменение условий среды, включая интенсивность фотосинтеза, продолжительность жизни хвои, эффективность ее работы и т. д., таким образом, позволяя повысить общую продуктивность насаждений.

Цель настоящего исследования – изучение динамики прироста разногустотных сосновых молодняков в контексте эффективности работы ассимиляционного аппарата.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Объектом исследований служили молодняки сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), сформировавшиеся на бывших сельскохозяйственных угодьях в Красноярской лесостепи (Онучин и др., 2022). Близость источников семян (стены соснового леса находятся на расстоянии менее 100 м от исследуемых молодняков) обеспечила относительно быстрое заселение пустующих сельхозугодий и способствовала формированию одновозрастных загущенных молодняков. На участках, удаленных на расстояние более 300 м от стены леса, сформировались молодняки, в которых на начальном этапе деревья росли в условиях, приближенных к свободному росту. Начало залесения территории – 2001–2002 гг. На части сосняка с высокой начальной густотой на момент закладки пробных площадей (пп) в 8-летнем возрасте проведены рубки ухода со снижением густоты до 2.9 тыс. шт./га (пп 3), в качестве контроля служил сосняк, не тронутый рубками (пп 5) с начальной густотой деревьев 40.7 тыс. шт./га. В насаждении, удаленном на 300 м от стены леса, заложена пп 2, представляющая собой одновозрастной сосняк с единично встречающимися деревьями березы (*Betula* L.), начальная густота которого составляла 10.8 тыс. шт./га. Размеры пп 3 и 2 составляли 20 × 20 м, пп 5, заложеной в насаждении с начальной густотой 40.7 тыс. шт./га, – 20 × 15 м. При этом обеспечивалось наличие буферных зон шириной не менее 5 м по всему периметру пробных площадей с соответствующей густотой (табл. 1).

Оценка основных таксационных характеристик древостоев проводилась по общепринятым методикам (Побединский, 1966; Моисеев, 1971; Усольцев, 2007). На пробных площадях проводился сплошной пересчет с замером диаметров на высоте груди и измерением высот

Таблица 1. Таксационная характеристика пробных площадей

Номер пп	Густота, шт./га	Средние			$\Sigma G, \text{ м}^3/\text{га}$	Запас, $\text{ м}^3/\text{га}$	Полнота
		возраст, лет	$D_{1,3}, \text{ см}$	$H, \text{ м}$			
5	14 333	22	6.46 ± 2.6	9.3 ± 1.8	47.05 ± 0.1	245.44 ± 5.6	1.4
2	5775	22	9.66 ± 3.5	10.3 ± 1.4	42.29 ± 0.14	232.37 ± 5	1.3
3	2900	22	12.76 ± 3.3	11.2 ± 0.7	37.06 ± 0.17	219.16 ± 1.3	1

25–30 деревьев, выбираемых исходя из принципа пропорционально-ступенчатой представительности.

Для оценки прироста хвои, ветвей и корней в 2009, 2012 и 2021 гг. в буферных зонах каждой пробной площади отбирались модельные деревья по принципу пропорционально-ступенчатой представительности. Каждое модельное дерево разбиралось на отдельные фракции, которые взвешивались с отбором образцов на влажность. Возрастная структура хвои оценивалась путем взвешивания хвои отдельно по возрастам. Для оценки прироста хвои учитывалась ее масса за последние 2 года, в течение которых хвоя во всех вариантах опыта имела 100%-ю сохранность.

Оценка способности сосновых древостоев к усвоению световой энергии проводилась с использованием импульсного флуориметра Walz junior PAM (Heinz Walz GmbH). Измерения проводили по стандартной программе Light Curve в ПО Wincontrol 3. На каждой пробной площади подбирались по 5 модельных деревьев, охватывая низшую, среднюю и максимальную ступени толщины, у каждого дерева с южной стороны срезалась модельная ветвь из мутовки второго года жизни. У каждой ветви из средних частей побегов первого и второго года жизни отбиралось по 3 интактные хвоинки. Более детально методика изложена в руководстве по работе с флуориметром PAM (JUNIOR..., 2020). Эффективность работы фотосинтетического аппарата

оценивалась посредством скорости переноса электронов (ETR) (Schansker, 2020).

Интегральную для древостоев скорость переноса электронов и прироста рассчитывали посредством использования характера распределения деревьев по ступеням толщины в каждом из насаждений.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Динамика прироста исследуемых насаждений аппроксимировалась полиномом второго порядка (рис. 1).

На начальном этапе роста насаждений прирост древесины во всех вариантах опыта возрастает, однако с 15 лет в перегушенном варианте он начинает снижаться, что обусловлено, вероятно, усилением конкурентных отношений и элиминацией части носителей прироста. Тенденция увеличения прироста древесины с возрастом сохраняется в древостое с меньшей начальной густотой и в насаждении, пройденном рубками ухода. Однако с возрастом прирост в насаждении, пройденном рубками ухода, становится выше, нежели в варианте с меньшей начальной густотой. Выявленная специфика динамики прироста древесины исследуемых насаждений свидетельствует о том, что рубки ухода на начальном этапе роста древостоев могут обеспечить существенный лесоводственный эффект.

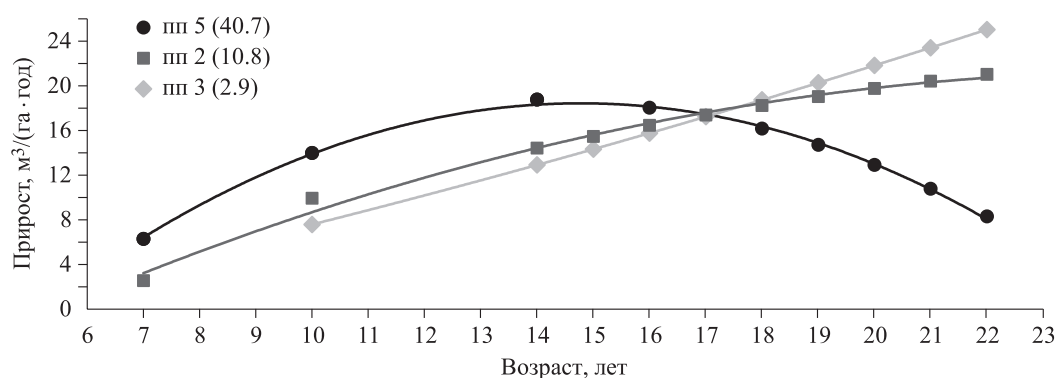


Рис. 1. Зависимость прироста древесины от возраста сосновых молодняков различной густоты.

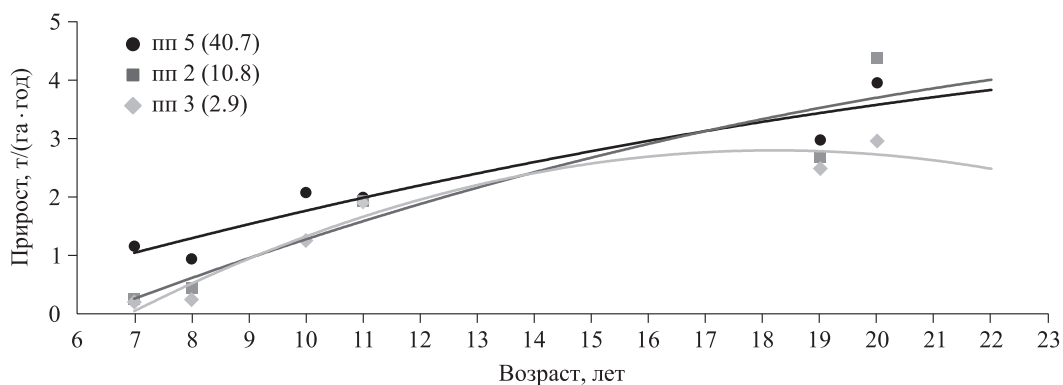


Рис. 2. Прирост массы хвои в абсолютно сухом состоянии сосновых молодняков различной густоты.

фект и служить действенным способом формирования целевых насаждений. Данный результат нашего исследований согласуется с выводами М. В. Рогозина и Г. С. Разина (2012) о том, что период кульминации текущего прироста в насаждениях различной начальной густоты наступает в разные сроки. В плотных ценозах, где обострена конкуренция за ресурсы среды, максимум прироста наступает раньше, чем в низкоплотных насаждениях, и в первом случае он оказывается ниже, чем в насаждениях некой оптимальной густоты.

Следует отметить, что высокие значения прироста древесины, существенно превышающие таковые в сравнении с данными таблиц хода роста сосняков I класса бонитета, обусловлены разными причинами. В насаждениях, не пройденных рубками ухода, это – полнота древостоев, которая существенно выше табличной. В насаждении, пройденном рубками ухода, повышенный прирост обусловлен, очевидно, оптимальной для данного возраста густотой.

Фотосинтез является основополагающим процессом, благодаря которому растения получают энергию, необходимую для их роста и развития. Состояние фотосинтетического аппарата может служить критерием жизненного состояния и продуктивности, в том числе древесных растений и их сообществ. Очевидно, что процессы прироста древесины в сосновых молодняках также должны быть обусловлены параметрами ассимиляционного аппарата исследуемых насаждений.

В этой связи определенный интерес представляет анализ прироста хвои изученных насаждений (рис. 2).

Аппроксимация динамики прироста хвои проводилась тем же методом, что и прироста древесины.

Изменение прироста массы хвои в абсолютно сухом состоянии можно описать следующими уравнениями:

$$\text{пп 5 (40.7)} \quad y = -0.0045 \cdot x^2 + 0.316 \cdot x - 0.9488; \quad R^2 = 0.908; \quad (1)$$

$$\text{пп 2 (10.8)} \quad y = -0.0074 \cdot x^2 + 0.465 \cdot x - 2.6329; \quad R^2 = 0.886; \quad (2)$$

$$\text{пп 3 (2.9)} \quad y = -0.0219 \cdot x^2 + 0.7975 \cdot x - 4.4623; \quad R^2 = 0.954; \quad (3)$$

где y – значение прироста массы хвои в абсолютно сухом состоянии, т/(га · год); x – возраст, лет.

Древостои, не пройденные рубками ухода, независимо от начальной густоты демонстрируют устойчивую тенденцию повышения прироста массы хвои на протяжении всего периода наблюдений. В насаждении, пройденном рубками ухода, такая тенденция сохраняется до 18-летнего возраста. Затем прирост хвои стабилизируется на уровне 2.5 т/(га · год) и даже слегка снижается (рис. 2). Здесь мы, казалось бы, сталкиваемся с парадоксальной ситуацией, когда устойчивое увеличение прироста древесины в этом насаждении на протяжении всего периода наблюдений сопровождается снижением прироста массы хвои после 18-летнего возраста. В противоположность этому в максимально загущенном сосняке (пп 5), где вследствие обострившейся внутривидовой конкуренции начиная с 15-летнего возраста отмечено снижение темпов прироста древесины, прирост массы хвои сохраняет свои темпы. В то же время в сосняке, начальная густота которого составляла 10.8 тыс. шт./га, темпы прироста как древесины, так и хвои сохраняют тенденции устойчивого роста.

Для объяснения данного феномена нами проведена оценка состояния фотосинтетическо-

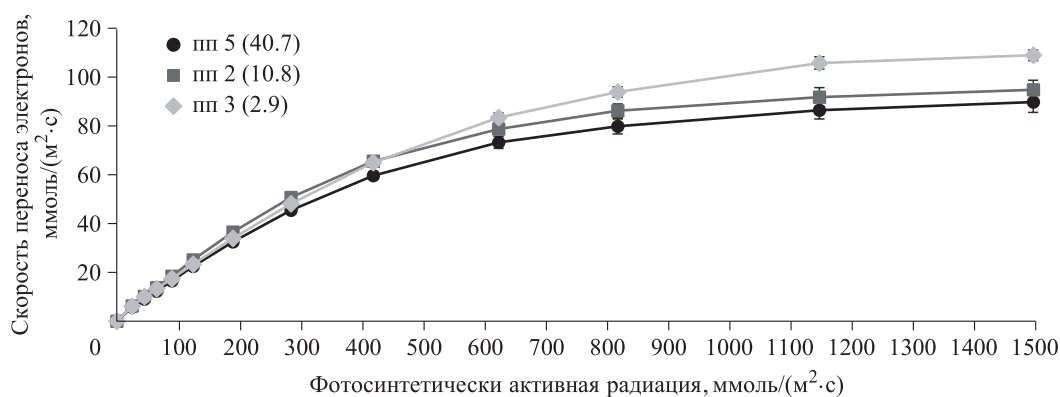


Рис. 3. Эффективность фотосинтеза сосновых молодняков различной густоты.

го аппарата. Продуктивность насаждений определяется не только массой ассимиляционного аппарата, а еще и интенсивностью фотосинтеза – эффективностью использования световой энергии и преобразованием углерода в органические соединения. Для оценки способности деревьев к усвоению световой энергии измерялась флуоресценция с использованием флуориметра JUNIOR-PAM. Эффективность работы фотосинтетического аппарата оценивалась по скорости переноса электронов (ETR) с учетом синтетически активной радиации (PAR) в период вегетации. Полученные результаты свидетельствуют о том, что наибольшая скорость переноса электронов в большей части спектра (при высокой интенсивности) фотосинтетически активной радиации наблюдается у хвой деревьев, продуцирующих в условиях, приближенных к свободному росту (пп 3), тогда как в плотных древостоях она существенно ниже. Дисперсионный анализ показал значимые различия в скорости переноса электронов при высоких значениях PAR (820 и выше). Таким образом, можно констатировать, что хвоя деревьев, произрастающих в условиях, близких к свободному росту, функционирует более эффективно, особенно при высокой интенсивности солнечного света (рис. 3).

Если сравнивать эффективность работы хвой в части продуцирования стволовой древесины, то можно отметить, что в сосновых молодняках, пройденных рубками ухода (пп 3) 1 т хвой обеспечивает прирост 7 м³ древесины в насаждениях, начальная густота которых составляла 10.8 тыс. шт./га, а в максимально густых – всего 4.7 м³. Полученные результаты могут использоваться при обосновании лесохозяйственных мероприятий, направленных на формирование структуры целевых сосновых насаждений. Кроме того, они позволяют понять феномен уменьшения прироста хвой в насаждениях,

пройденных рубками ухода, по сравнению с более плотными древостоями, где обострены конкурентные отношения и имеет место естественное самоизреживание. В относительно низкополнотных древостоях, пройденных рубками ухода, отмечена высокая эффективность работы ассимиляционного аппарата. Здесь также наблюдается и большая продолжительность жизни хвой (до 4 лет) по сравнению с более плотными насаждениями (не более 3 лет). Этот факт свидетельствует о том, что в таких условиях для поддержания на должном уровне жизненного состояния деревьев, формирующих совокупный древостой, достаточно и относительно невысокого прироста массы хвой.

В то же время в древостое, испытывающем наиболее жесткие конкурентные отношения, интенсивный прирост хвой компенсирует сокращение продолжительности ее жизни. Кроме того, он необходим и для поддержания на должном уровне жизненного состояния деревьев в данном насаждении, где и так уже наблюдается снижение прироста древесины.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование показало, что наибольший прирост древесины на ранних этапах роста древостоя характерен для перегушенных сосняков, однако с 15-летнего возраста наблюдается снижение прироста из-за обостренных конкурентных отношений, тогда как в древостоях с меньшей густотой, включая варианты с рубками ухода, прирост древесины продолжает увеличиваться.

Интересен парадокс, что при линейном увеличении прироста древесины в варианте с рубками ухода снижается прирост хвой, которая его обеспечивает. Более того, прирост ассимиляционного аппарата в перегушенных древостоях увеличивается, тогда как прирост древесины

значительно снижается. Этот феномен демонстрирует различия в эффективности работы фотосинтетического аппарата, который был подтвержден экспериментально.

Очевидно, что посредством регулирования густоты и структуры древостоев можно получать соответствующий лесоводственный эффект в зависимости от целевого назначения лесов, будь то карбоновые фермы либо промышленные плантации, ориентированные на заготовку различных сортиментов древесины.

Работа выполнена в рамках государственного задания № FWES-2024-0040 и реализации важнейшего инновационного проекта государственного значения «Разработка системы наземного и дистанционного мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов на территории Российской Федерации, обеспечение создания системы учета данных о потоках климатически активных веществ и бюджете углерода в лесах и других наземных экологических системах» (рег. № 123030300031-6).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бузыкин А. И., Пшеничникова Л. И. Влияние густоты на морфоструктуру и продуктивность культур сосны // Лесоведение. 1999. № 3. С. 38–43.
- Моисеев В. С. Таксация молодняков. Л.: ЛЛТА им. С. М. Кирова, 1971. 343 с.
- Онучин А. А., Маркова И. И., Павлов И. Н. Влияние рубок ухода на радиальный прирост стволов и формирование сосновых молодняков // Хвойные бореал. зоны. 2011. Т. 29. № 3–4. С. 258–267.
- Онучин А. А., Петренко А. Е., Собачкин Д. С., Собачкин Р. С. Реакция сосновых молодняков Красноярской лесостепи на изреживание и внесение азотных удобрений // Сиб. лесн. журн. 2022. № 3. С. 6–14.
- Онучин А. А., Данилин И. М. Способ формирования карбоновых ферм. Патент РФ на изобретение № 2807337. М.: Роспатент, 2023.
- Побединский А. В. Изучение лесовосстановительных процессов. 2-е изд. М.: Наука, 1966. 64 с.
- Разин Г. С. О законах и закономерностях роста и развития, жизни и отмирания древостоев // ИВУЗ. Лесн. журн. 2012. № 1. С. 18–23.
- Рогозин М. В. Влияние площадей питания на отпад деревьев в культурах сосны // Сиб. лесн. журн. 2024. № 1. С. 57–66.
- Рогозин М. В., Разин Г. С. Развитие древостоя и его константы // Вестн. Перм. гос. ун-та. Сер. Биол. 2012. № 2. С. 13–21.
- Усольцев В. А. Биологическая продуктивность лесов Северной Евразии: методы, база данных и ее приложения. Екатеринбург: УрО РАН, 2007. 637 с.
- Schanker G. Chlorophyll fluorescence and photosynthesis: Simple experiments with the JUNIOR-PAM chlorophyll fluorometer. First Ed. Effeltrich, Germany: Heinz Walz GmbH, 2020. 130 p.
- JUNIOR-PAM teaching chlorophyll fluorometer manual. Second Ed. Effeltrich, Germany, 2020. 77 p.

SPECIFICITY OF INCREMENT OF YOUNG PINE STANDS OF DIFFERENT DENSITY IN KRASNOYARSK FOREST-STEPPE IN THE CONTEXT OF EFFICIENCY OF ASSIMILATION APPARATUS

A. A. Onuchin, V. E. Aryasov, A. M. Schemberg

*V. N. Sukachev Institute of Forest, Russian Academy of Sciences, Siberian Branch,
Federal Research Center Krasnoyarsk Scientific Center, Russian Academy of Sciences, Siberian Branch
Akademgorodok, 50/28, Krasnoyarsk, 660036 Russian Federation*

E-mail: onuchin@ksc.krasn.ru, Vova_aryasov@mail.ru, Antonschemberg@gmail.com

Synchronous observations of the dynamics of wood and needle increment in young 22-year-old pine stands on former agricultural lands in Krasnoyarsk forest-steppe were conducted. It was found that overcrowded stands (the initial density of which was 40.7 thousand pcs./ha) reach the maximum wood increment at the age of 15 years, after which a steady decrease is observed. Stands with an initial density of 10.8 thousand trees/ha, as well as stands, the density of which as a result of thinning at the age of 8 years was reduced to 2.9 thousand trees/ha, demonstrate a continuing increase in wood increment throughout the observation period. At the same time, in the variant with thinning, stabilization and some decrease in the increment of needle mass are observed at the age of 18 years, while stands that have not undergone thinning, regardless of the initial density, retain a tendency to increase the increment of needle mass. The apparent paradox of a decrease in wood increment at a certain age with simultaneous preservation of the tendency to increase needle increment in densely densified young growth and a decrease in needle increment with simultaneous preservation of the tendency to increase wood increment in a stand undergoing thinning is explained by an increase in the efficiency of the assimilation apparatus under conditions of low competition for environmental resources. This fact is confirmed by special studies of the efficiency of needle photosynthesis in densely densified pine forests and tree stands where trees produce under conditions close to free growth. The results obtained may be useful in growing stands for various purposes.

Keywords: *young pine stands, care logging, tree stand density, needle increment, wood increment, carbon sequestration, photosynthesis.*

How to cite: *Onuchin A. A., Aryasov V. E., Schemberg A. M. Specificity of increment of young pine stands of different density in Krasnoyarsk forest-steppe in the context of efficiency of assimilation apparatus // Sibirskij Lesnoj Zurnal (Sib. J. For. Sci.). 2024. N. 5. P. 28–34 (in Russian with English abstract and references).*