



**Арясов Владимир Евгеньевич**

**ФОРМИРОВАНИЕ СОСНОВЫХ МОЛОДНЯКОВ НА БЫВШИХ  
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ УГОДЬЯХ В КРАСНОЯРСКОЙ  
ЛЕСОСТЕПИ**

4.1.6 — Лесоведение, лесоводство, лесные культуры, агролесомелиорация,  
озеленение, лесная пирология и таксация (биологические науки)

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации, на соискание ученой степени  
кандидата биологических наук

Работа выполнена в Институте леса имени В.Н. Сукачева Сибирского отделения Российской академии наук — обособленном подразделении Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» (ИЛ СО РАН ФИЦ КНЦ СО РАН)

**Научный руководитель:** Онучин Александр Александрович, доктор биологических наук, профессор, директор Института леса, обособленного подразделения ФИЦ КНЦ СО РАН

**Официальные оппоненты:** Крышень Александр Михайлович, доктор биологических наук, старший научный сотрудник, главный научный сотрудник лаборатории динамики и продуктивности таежных лесов Института леса – обособленного подразделения Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Карельский научный центр Российской академии наук» (ИЛ КарНЦ РАН)

Агеев Александр Александрович, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, заведующий лабораторией защиты и воспроизводства лесов филиала федерального бюджетного учреждения «Всероссийский научно-исследовательский институт лесоводства и механизации лесного хозяйства» «Центр лесной пирологии, развития технологий охраны лесных экосистем, защиты и воспроизводства лесов» (Филиал ФБУ ВНИИЛМ «Центр лесной пирологии»)

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева»

Защита диссертации состоится « 06 » октября 2026 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета 24.1.228.05 при Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» (ФИЦ КНЦ СО РАН) по адресу: 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50/28. Тел./факс (391) 243-36- 86, Email: [institute\\_forest@ksc.krasn.ru](mailto:institute_forest@ksc.krasn.ru)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИЛ СО РАН и на сайте организации <http://forest.akadem.ru>

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2026 г.

Ученый секретарь диссертационного совета доктор биологических наук, доцент Гродницкая Ирина Дмитриевна



## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность проблемы.** Изучение закономерностей формирования сосновых древостоев приобретает особую значимость в условиях перехода лесного хозяйства России к парадигме устойчивого управления, которое предполагает не только получение древесных ресурсов, но и обеспечение всего спектра экосистемных услуг. Ключевой из этих услуг, в современном мире, является депонирование атмосферного углерода, способствующее смягчению последствий изменения климата. В этой связи особую значимость приобретают миллионы гектаров бывших сельскохозяйственных земель, заброшенных с 1990-х годов и активно зарастающих лесом. Эти территории рассматриваются как перспективный резерв для создания высокопродуктивных насаждений, целенаправленно формируемых для выполнения как ресурсных, так и климаторегулирующих функций.

Вместе с тем, объективная оценка углероддепонирующей способности лесов требует учёта динамики накопления не только стволовой древесины, но и всех фракций фитомассы, доля которых в общем пуле углерода может быть сопоставима или превышать долю стволовой массы. Однако влияние начальной густоты, естественных процессов внутривидовой конкуренции и лесохозяйственных мероприятий, таких как рубки ухода, на распределение прироста по фракциям древостоя остаётся малоизученным (Данилов и др., 2023), что затрудняет точную оценку их реального вклада в депонирование углерода (Онучин и др., 2022). Получение таких данных критически важно для обоснования конверсионных коэффициентов при объективной оценке депонирования углерода и реализации лесоклиматических проектов, включая создание карбоновых ферм и торговлю углеродными квотами (Онучин, и др., 2024).

Потенциал и скорость роста древостоев в значительной степени определяются стартовыми условиями. Установлено, что оптимальная продуктивность и интенсивность депонирования углерода достигаются при

густотно-возрастных оптимумах, регулируемых рубками ухода (Kurbatova, 2020). Наиболее целесообразно проведение таких мероприятий на ранних этапах онтогенеза насаждений, когда закладываются траектории их дальнейшего развития и формируется физиологическая реакция деревьев на изменение условий среды. Таким образом, исследование закономерностей формирования сосновых древостоев на заброшенных сельскохозяйственных землях в условиях различной интенсивности конкуренции для оптимизации их продукционной и средообразующей функций представляет собой актуальную научную задачу, имеющую важное практическое значение для лесного хозяйства.

### **Цель работы:**

Выявить особенности формирования фитомассы сосновых молодняков различной густоты на бывших сельскохозяйственных угодьях.

### **Задачи исследования:**

1. Определить величину и исследовать возрастную динамику годичной продукции основных компонентов фитомассы (хвоя, ветви, древесина стволов, корни) и связанного с ней депонирования углерода в сосновых молодняках различной начальной густоты.

2. Оценить влияние конкурентных отношений и рубок ухода на формирование фитомассы и эффективность работы фотосинтетического аппарата сосновых молодняков.

### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Густота древостоев определяет не только величину общей фитомассы, но и обуславливает специфику перераспределения прироста между ее отдельными фракциями.

2. Различия в динамике прироста древесины и хвои в древостоях разной густоты обусловлены адаптивной реакцией деревьев на изменение конкурентных отношений и напрямую связаны с эффективностью работы ассимиляционного аппарата.

3. Эффективность работы ассимиляционного аппарата находится в обратной зависимости от плотности древостоя: снижение густоты приводит к усилению фотосинтеза, что компенсирует меньший годичный прирост хвои.

**Научная новизна работы** заключается в выявлении специфики прироста различных фракций фитомассы, которая является реакцией на различие лесорастительных условий определяемых густотой насаждений и влияющих на эффективность работы ассимиляционного аппарата. Результаты исследований могут служить теоретической основой ведения лесного хозяйства на принципах прецизионного лесоводства в рамках модели интенсивного использования и воспроизводства лесов.

#### **Теоретическая и практическая значимость**

Теоретическая значимость исследования заключается в получении новых знаний о специфике формирования сосновых молодняков в условиях лесостепной зоны Средней Сибири. Выявленные закономерности дополняют современные представления о динамике накопления различных фракций фитомассы и позволяют проводить количественную оценку их прироста на начальных этапах онтогенеза. Полученные данные углубляют понимание продукционных процессов в естественных ценозах региона. Результаты исследования могут быть использованы при разработке научно обоснованных рекомендаций по выращиванию высокопродуктивных сосновых древостоев. Материалы применимы для совершенствования лесохозяйственных регламентов, систем рубок ухода и технологий лесовосстановления в лесостепной зоне Средней Сибири. Кроме того, полученные данные позволяют существенно повысить точность учета депонирования диоксида углерода (CO<sub>2</sub>) сосновыми насаждениями, что имеет особое значение при разработке и реализации лесоклиматических проектов на региональном уровне.

**Достоверность результатов исследования** обеспечивается репрезентативным объемом материала, использованием современного

высокоточного оборудования, стандартными методами сбора и обработки данных, а также статистическим анализом полученных результатов.

**Личный вклад автора.** В период с 2019 по 2025 гг. автором самостоятельно осуществлены: сбор и обработка полевого материала, проведение лабораторных анализов, математическая обработка и интерпретация полученных данных. Архивные данные, полученные ранее 2019 года, подвергались анализу автором лично.

**Апробация работы.** Материалы работы докладывались на Междисциплинарной конференции молодых учёных ФИЦ КНЦ СО РАН (КМУ-XXIV) (Красноярск, 2021); Междисциплинарной конференции молодых учёных ФИЦ КНЦ СО РАН (КМУ-XXVI) (Красноярск, 2023); IV Всероссийской отчетной конференции магистрантов, аспирантов и молодых учёных-грантодержателей Красноярского краевого фонда науки и II Съезде советов молодых учёных и специалистов Енисейской Сибири (Красноярск, 2023); XV Сибирском совещании и школе молодых ученых по климато-экологическому мониторингу (всероссийская конференция с международным участием) (Томск, 2023); Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (с международным участием) (Красноярск, 2023); Междисциплинарной конференции молодых учёных ФИЦ КНЦ СО РАН (КМУ-XXVII) (Красноярск, 2024).

**Публикации:** По результатам исследований опубликовано 9 работ, из них, 3 – статьи в рецензированных журналах (2 из них рекомендованных ВАК), 6 – материалы конференций.

**Благодарности:**

Автор выражает благодарность научному руководителю д.б.н., проф. А.А. Онучину за ценные советы, обсуждение и обобщение материала, а также всестороннюю поддержку на всех этапах работы. Автор очень признателен коллективу лаборатории экспериментальной и прикладной экологии за ценные советы и рекомендации.

## **Структура и объем работы.**

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и выводов, списка литературы из 209 наименований, из которых 85 работ на иностранных языках. Текст работы изложен на 127 страницах, содержит 7 таблиц, 36 рисунков и 25 формул.

### **Глава 1. Теоретические основы исследования**

Сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.) – одна из главных лесообразующих пород России, обладающая обширным ареалом, значительной хозяйственной ценностью и важным значением для углеродного баланса (Побединский, 1979; Giertych, 1991; Kivimäenpää et al., 2020). Вид светолюбив, малотребователен к почвам, активно заселяет нарушенные земли – гари, вырубki и залежи (Атрохин, 1988; Попков, Сорокина, 2023). В перегушенных молодняках идет интенсивное самоизреживание; управление густотой и продуктивностью с помощью рубок ухода в мировой практике обеспечивает до 70 % объёма заготовок, тогда как в России их доля невелика (Тихонов, 2020). При умеренной интенсивности рубок ухода в возрасте 10–20 лет увеличивается радиальный прирост на 10–25 %, улучшается форма стволов и углероддепонирующая способность (Brockley, 2005; Yoshimoto, Marusak, 2007). Значительным резервом для лесовосстановления служат заброшенные сельскохозяйственные земли (залежи), где сосна часто становится доминантом, в том числе в лесостепной зоне Красноярского края (Люри и др., 2010; Schierhorn et al., 2013; Нечаева, 2023). Однако для этих территорий пока не разработаны научно обоснованные режимы рубок ухода и методы количественной оценки углеродного потенциала (Шпедт, Трубников, 2017; Бугаевская и др., 2023).

Фотосинтез – ключевой процесс фиксации CO<sub>2</sub> и формирования фитомассы, а эффективность работы фотосинтетического аппарата прямо связана с продуктивностью (Baker, 2008). В настоящей работе применён комплексный подход, сочетающий традиционные таксационные методы определения запасов

фитомассы с неинвазивными методами оценки физиологического состояния ассимиляционного аппарата. Такой подход даёт возможность количественно увязать актуальную структуру фитомассы с функциональным потенциалом древостоев.

Анализ современных исследований, посвящённых формированию и продуктивности сосновых насаждений на залежных землях, показал, что в условиях лесостепной зоны Средней Сибири ранее не проводились сопряжённые оценки физиологического состояния и аккумуляции углерода молодняками под воздействием рубок ухода. Отсутствуют данные о связи инструментальных физиологических показателей с приростом различных фракций фитомассы, что ограничивает возможности точного прогнозирования углероддепонирующей способности древостоев. Таким образом, тема исследования является своевременной и направлена на решение актуальной научно-практической задачи.

## **Глава 2. Объекты и методы исследования**

### **2.1. Объекты исследования**

Основные исследования проводились на стационаре «Погорельский бор» ИЛ СО РАН (56°22' с.ш., 92°57' в.д.), расположенном в Красноярской островной лесостепи (Тарасова и др., 2002; Семечкина, 1978). Климат резко континентальный, среднегодовая температура +0.5...+1.7 °С, годовое количество осадков 380–470 мм (Антипова, 2008; Бугаева, 2009). Почвы дерново-подзолистые и серые лесные, длительно сезонномерзлотные (Боболева, 1968; Бугаева, 2009). В растительности преобладают сосновые насаждения с участием мелколиственных пород и зеленых мхов.

Изучались три варианта древостоев с разной густотой (таблица): ПП5 (контроль): перегущенный древостой (густота 40.7 тыс. шт./га на момент закладки (2009 г.)), не пройденный рубками ухода; ПП2: молодняк, сформировавшийся в условиях низкой конкуренции на удалении 300 м от стены леса (густота 10.8 тыс. шт./га (2009 г.)); ПП3: изначально перегущенный древостой (густота 40.7 тыс.

шт./га (2009г.)), пройденный в 8-летнем возрасте (2009 г.) рубками ухода высокой интенсивности (93%), с конечной густотой 2.9 тыс. шт./га. (Ковалева, Собачкин, 2018; Онучин и др., 2022; Арясов, 2025).

Таблица Таксационная характеристика пробных площадей 2023 г.

	Густота, шт./га		Средние		$\sum G$ , м <sup>2</sup> /га	Запас, м <sup>3</sup> /га	Полнота
	Начальная (8 лет)	22 года	D1.3, см	H, м			
ПП5	40700	14333	6.46±2.6	9.3±1.8	47.05±0.1	245.44±5.6	1.4
ПП2	10800	5775	9.66±3.5	10.3±1.4	42.29±0.14	232.37±5	1.3
ПП3	40700	2900	12.76±3.3	11.2±0.7	37.06±0.17	219.16±1.3	1

Для сравнительной оценки углероддепонирующей функции привлекались данные, полученные в среднетаёжной зоне (район обсерватории ZOTTO, ~60° с.ш., 90° в.д.). Объектами служили 18–19-летние естественные сосновые молодняки на вырубке с тремя градациями густоты: ППZ1 – 20.6 тыс. шт./га; ППZ2 – изначально 15.9, а после рубок ухода 3.0 тыс. шт./га; ППZ3 – 8.3 тыс. шт./га. Исследования на этих площадях выполняются с 2022г по той же методике, что и в лесостепи.

## 2.2 Методы исследования

### 2.2.1. Таксация и оценка фитомассы

Оценка таксационных характеристик (диаметр, высота, запас) проводилась в 2009, 2012, 2016, 2019-2023 гг. по общепринятым методикам (Побединский, 1966; Моисеев, 1971; Усольцев, 2007). На пробных площадях выполнялся сплошной пересчет, высоты измерялись у 25–30 модельных деревьев, отобранных по принципу пропорционально-ступенчатой представительности.

Для оценки фитомассы в 2009, 2012 и 2021 гг. отбирались модельные деревья, которые разделялись на фракции: ствол, ветви, хвоя и корневая система. Корневая система дифференцировалась на стержневой, скелетные и всасывающие

корни. Все фракции взвешивались, отбирались образцы для определения влажности. Объем стержневого корня определялся сегментированием и расчетом по формуле усеченного конуса. Для реконструкции годичного прироста корней и ветвей использовался векторный анализ отсканированных спилов в программе CorelDRAW с макросом Curve Info. Динамика запаса стволовой древесины анализировалась по данным пересчетов с использованием объемных таблиц. Пересчет объемного прироста в массу проводился с использованием средневзвешенных значений плотности и влажности, полученных в лаборатории. Полученные данные экстраполировались на пробную площадь и на 1 га с учетом распределения деревьев по ступеням толщины в ПО STATISTICA 12.

Для расчета депонирования  $\text{CO}_2$  древостоем использовались данные по приросту фитомассы в абсолютно сухом состоянии. Для перевода фитомассы в углерод использовался коэффициент 0.5, а для расчёта  $\text{CO}_2$  молярная масса углерода и кислорода:

$$\text{CO}_2 = \frac{44}{12} * C = \frac{44}{12} * \frac{M_{\text{сух}}}{2} = \frac{11}{6} * M_{\text{сух}} = 1.83 * M_{\text{сух}} \quad (1)$$

где  $\text{CO}_2$  – масса депонированного диоксида углерода, т/га;

C – масса депонированного углерода, т/га;

$M_{\text{сух}}$  – фитомасса древостоя (ствол, корень, ветви, хвоя) в абсолютно сухом состоянии, т/га.

### 2.2.2. Флуоресценция хлорофилла

Для оценки фотосинтетической активности использовали импульсно-амплитудную модуляционную флуориметрию хлорофилла с флуориметром Walz Junior PAM и ПО WinControl-3 (Schreiber et al., 1986; Baker, 2008; Heinz Walz GmbH, 2007). Определялись ключевые параметры работы фотосистемы II (ФСII):

• Максимальный фотохимический квантовый выход ФСII ( $F_v/F_m$ ). Этот параметр характеризует максимальный фотосинтетический потенциал неповрежденного фотосинтетического аппарата (ФА) (Kitajima and Butler, 1975).

• Эффективный фотохимический квантовый выход ФСII (Y(II)) отражает долю поглощенной световой энергии, используемую в фотохимических реакциях ФСII в изменяемых условиях освещения (Genty et al., 1989).

• Скорость переноса электронов (ETR): Расчетный показатель линейного потока электронов через ФСII ( $\mu\text{mol electrons}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  или мкмоль электронов/ $(\text{m}^2 \cdot \text{c})$ ). ETR является модельной оценкой скорости фотохимических реакций в ФСII, что является показателем эффективности работы фотосинтетического аппарата. (Schreiber, 2004; Gert Schansker, 2020). Более детально методика изложена в руководстве по эксплуатации флуориметра PAM (JUNIOR-PAM Teaching Chlorophyll Fluorometer Manual, 2020) и работах (Гольцев, 2014; Kramer, 2004; Krause, 1991; Jassby et al., 1976).

Измерения проводились в ранневесенний период (апрель 2022 г.) и в период активной вегетации (июль 2022 г.). С каждой пробной площади отбирались модельные деревья исходя из принципов равномерно-ступенчатой представленности, у которых отбирались ветви с южной стороны кроны, которые подвергались 30-минутной темновой адаптации. Измерения проводились по программе Light Curve (12 ступеней ФАР ( $\mu\text{mol photons}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  или мкмоль фотонов/ $(\text{m}^2 \cdot \text{c})$ ). Интегральные значения фотосинтетических параметров для древостоя рассчитывались как средневзвешенные с учетом распределения деревьев по ступеням толщины.

### **Глава 3. Динамика роста и формирования фитомассы сосновых молодняков**

К возрасту 22 лет в перегущенном древостое (вариант ПП5) (табл.) отмечено выпадение 65% деревьев (26.4 тыс. шт./га), тогда как в варианте с умеренной начальной густотой (ПП2) выпадение составило 47% (5 тыс. шт./га).

На ранних этапах онтогенеза (до 20 лет) максимальные показатели запаса стволовой древесины характерны для перегущенного варианта (ПП5). Однако анализ динамики текущего прироста выявил существенные различия между вариантами. В перегущенных молодняках максимум текущего прироста

наблюдается в более раннем возрасте, а с 15-летнего возраста начинается его снижение, обусловленное обострением конкурентных отношений. В противоположность этому, в древостоях с меньшей плотностью (ПП2 и ПП3) (табл.) прирост продолжает увеличиваться, демонстрируя отложенную кульминацию.

Прирост стволовой древесины. Годовой прирост массы стволов описывается уравнениями второго порядка. Наибольший прирост на ранних этапах также отмечен в перегущенных древостоях с последующим снижением после 15 лет (рисунок 1).

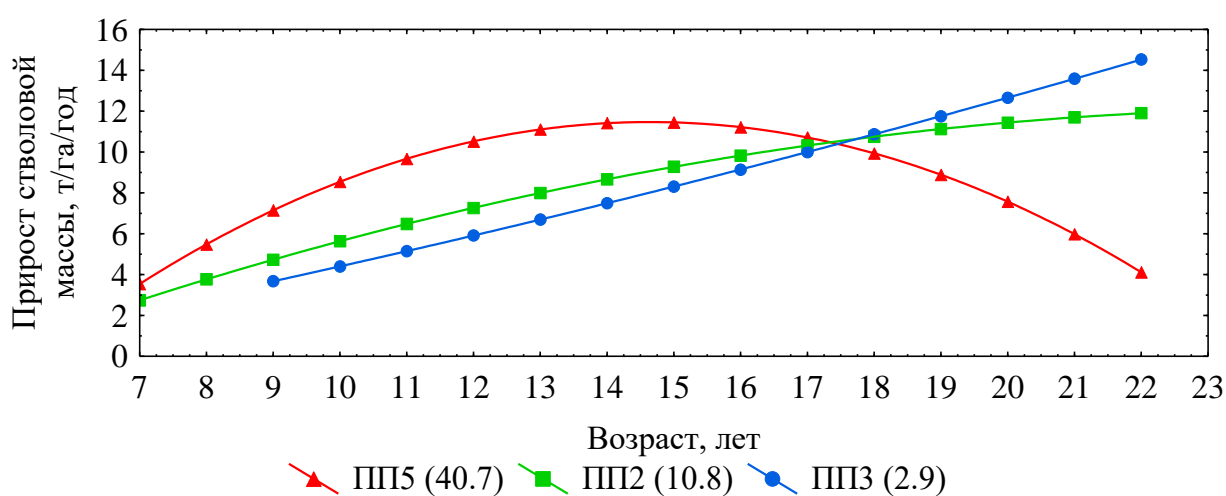


Рисунок 1 – Прирост массы стволовой древесины

Прирост корней. С 11-12-летнего возраста наибольший прирост массы корней наблюдается в древостое с умеренной плотностью (ПП2), что обусловлено отсутствием острой корневой конкуренции при достаточном количестве деревьев-носителей прироста. В перегущенном варианте (ПП5) прирост корней ниже из-за конкуренции за ресурсы, а в варианте с рубками ухода (ПП3) – из-за малого количества деревьев, хотя индивидуальная масса корней у них наибольшая. Динамика представлена на рисунке 2.

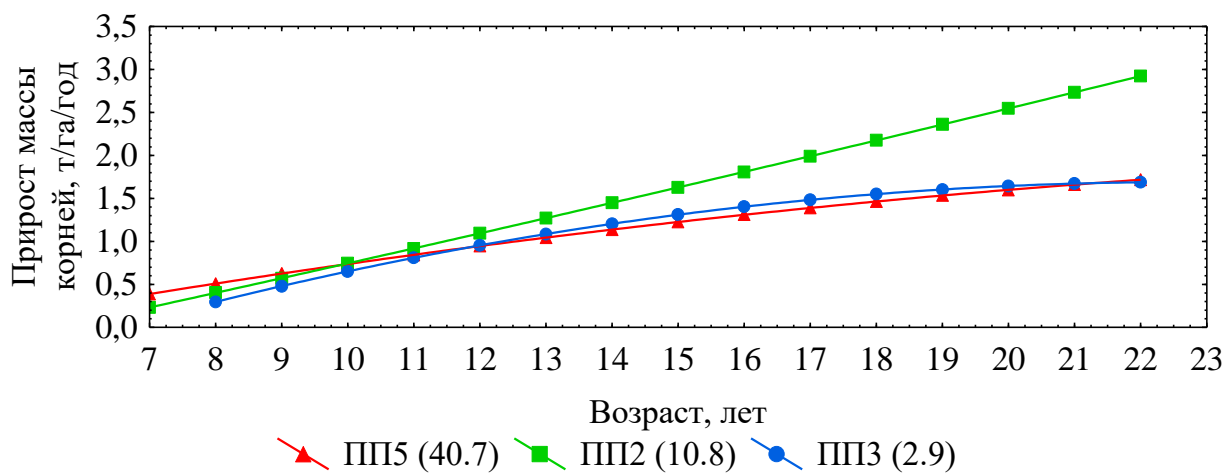


Рисунок 2 – Прирост массы корней

Прирост ветвей. Максимальные значения прироста ветвей характерны для высокоплотных молодняков (ПП5). Данное явление представляет собой компенсаторную реакцию на естественное отмирание отстающих в росте деревьев и образование "окон", направленную на увеличение фотосинтетического потенциала сохранившихся особей (рисунок 3).

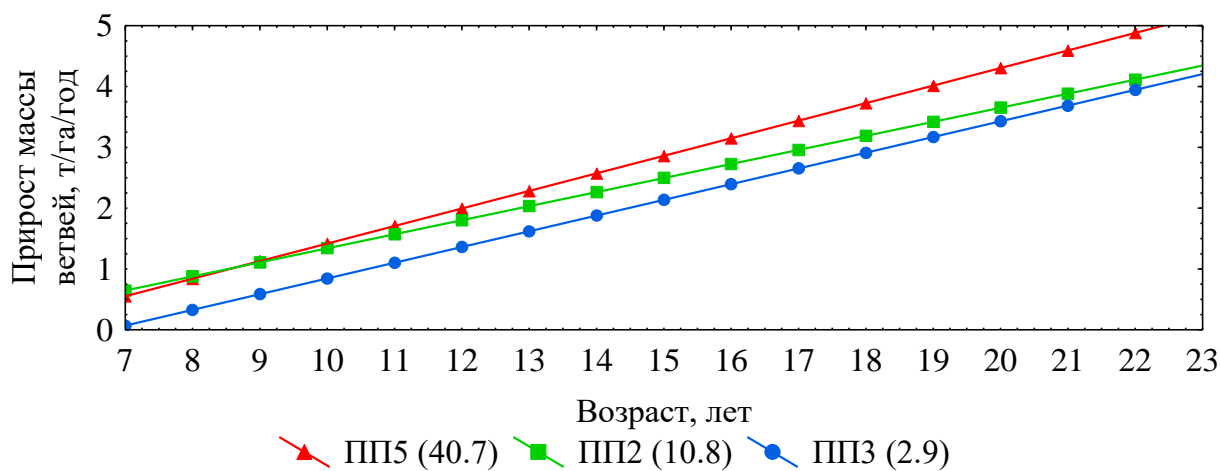


Рисунок 3 – Линейный прирост массы ветвей

Прирост хвои. Выявлена парадоксальная закономерность: в варианте ПП3 после 18-летнего возраста наблюдается стабилизация, и последующее снижение прироста массы хвои на фоне продолжающегося увеличения прироста древесины.

В то же время в перегушенном древостое (ПП5) при снижении прироста древесины прирост хвои продолжает увеличиваться. Это свидетельствует о различной эффективности работы фотоассимиляционного аппарата в насаждениях разной густоты. Динамика прироста хвои показана на рисунке 4.

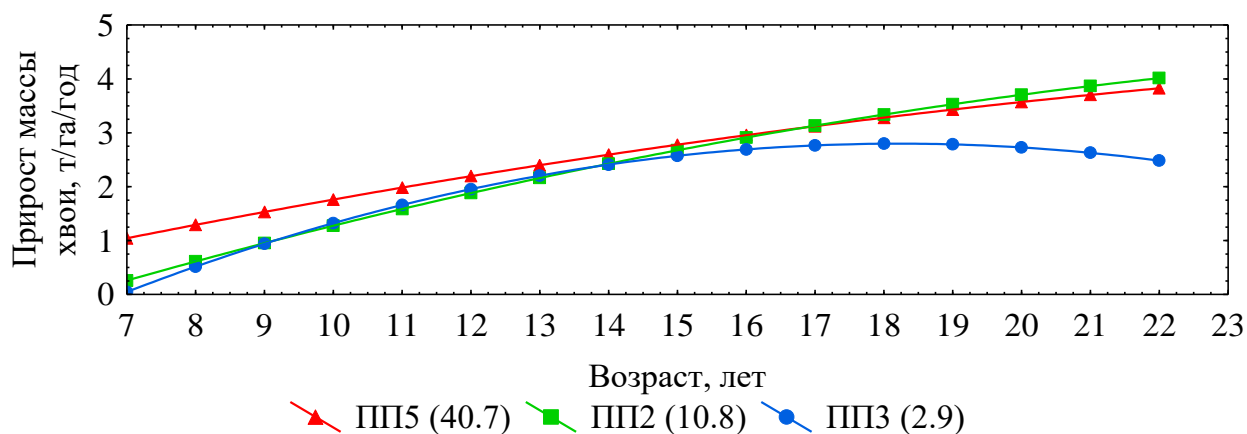


Рисунок 4 – Прирост массы хвои сосновых молодняков различной густоты

Структура прироста фитомассы. Анализ долей прироста различных фракций в общем приросте фитомассы выявил существенные различия между вариантами различной густоты:

В перегушенном древостое (ПП5) к 20 годам доля прироста стволов снизилась с 68% до 44%, в то время как доли прироста ветвей и хвои возросли с 11% и 15% до 26% и 21% соответственно. Доля корней составила 6-9% (рисунок 5).

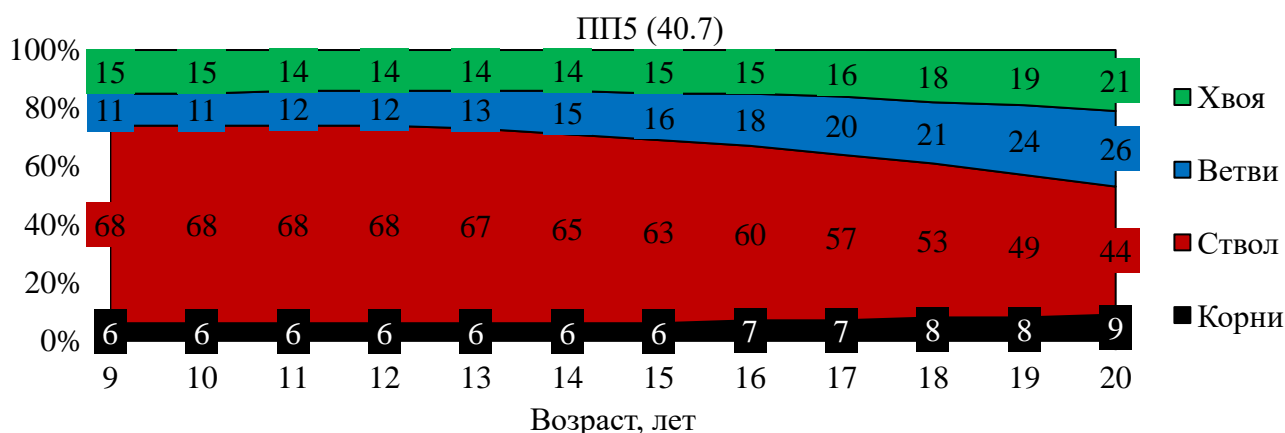


Рисунок 5 – Динамика структуры прироста фракций фитомассы перегушенного древостоя

В древостое с низкой начальной густотой (ПП2) доля прироста стволов к 20 годам снизилась с 65% до 54%. Отмечено увеличение доли хвои (с 13% до 17%) и ветвей (с 14% до 16%). Доля прироста корней была наибольшей среди всех вариантов и увеличилась с 8% до 13% (рисунок 6).

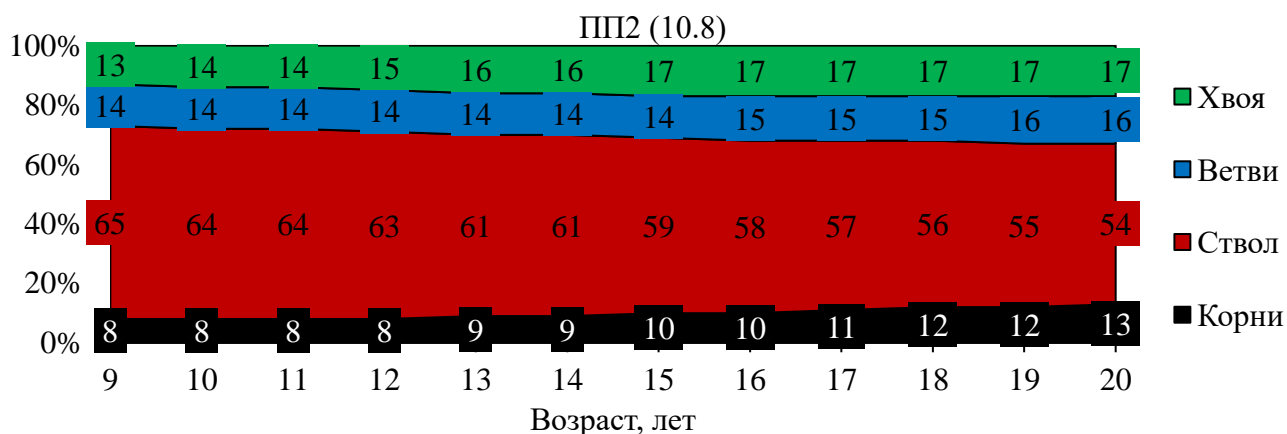


Рисунок 6 – Динамика структуры прироста фракций фитомассы древостоя с изначально низкой густотой

В древостое после рубок ухода (ПП3) зафиксировано снижение доли прироста стволов в первые 5 лет после проведения рубок ухода с 63% до 60% и дальнейшим увеличением до 64% к 20-ти летнему возрасту (рисунок 7). Прирост ветвей увеличился с 11 % до 15%, тогда как доля прироста хвои увеличилась в первые 5 лет после рубок ухода с 17% до 20%, а к 20 годам снизилась до 13%. Доля прироста массы корней сохранилась на уровне 9%.

Проведенные исследования подтвердили, что начальная густота древостоя и проведение рубок ухода оказывают решающее влияние на динамику и структуру прироста фитомассы. Обостренная конкуренция в перегущенных молодняках приводит к ранней кульминации прироста древесины и перераспределению ресурсов в пользу фотосинтетического аппарата (хвоя и ветви). Рубки ухода способствуют увеличению доли прироста стволовой древесины даже при снижении абсолютного прироста хвои.

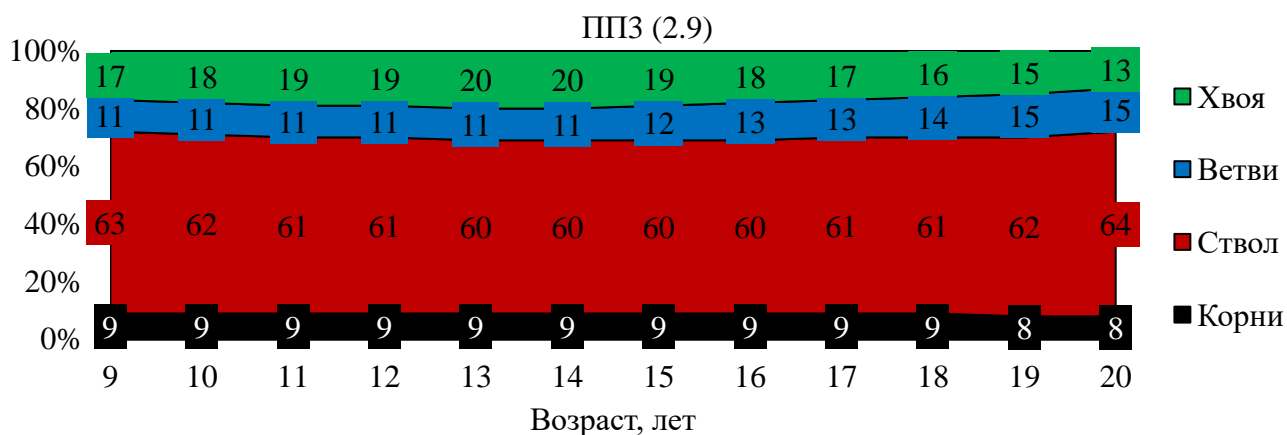


Рисунок 7 – Динамика структуры прироста фракций фитомассы древостоя пройденного интенсивными рубками ухода

#### Глава 4. Физиологические основы продуктивности

Установлены статистически значимые различия в активности фотосинтетического аппарата в ранневесенний период. Древостои естественной густоты (ПП5 и ПП2) характеризовались достоверно более высокими (на 20%) значениями  $F_v/F_m$  (рисунок 8) по сравнению с изреженными насаждениями (ПП3), что свидетельствует о более раннем выходе из состояния зимнего покоя в условиях естественной (повышенной) конкуренции за световые ресурсы. Однако данная стратегия характеризуется повышенным риском повреждения хвои возвратными заморозками. Древостои после рубок ухода (ПП3) демонстрировали более консервативную стратегию, отсрочивая активацию ФС II, что обеспечивало повышенную устойчивость к экстремальным погодным условиям.

В период активной вегетации максимальная фотохимическая эффективность ФС II ( $F_v/F_m > 0.8$ ) (рисунок 8) была статистически близкой во всех вариантах, что указывает на отсутствие повреждений фотосинтетического аппарата. Однако фактические показатели эффективности фотосинтеза существенно различались (рисунок 9-10).

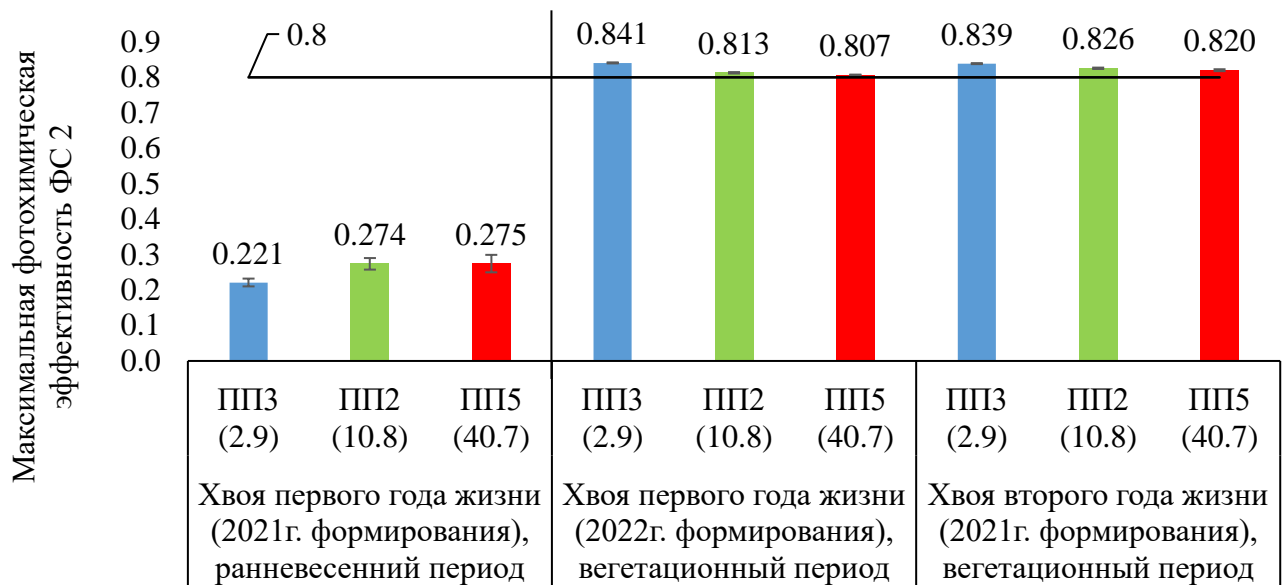


Рисунок 8 Максимальная эффективность фотосинтеза ФС II в ранневесенний и вегетационный периоды

Наибольшие значения ETR отмечены в древостоях, пройденных рубками ухода, особенно для хвои первого года жизни (рисунок 9) при высоких интенсивностях ФАР (разница достигала 21% при 1500  $\mu\text{mol photons}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ). В древостоях с естественной конкуренцией значения ETR были примерно равны для хвои первого года, но различались для хвои второго года жизни.

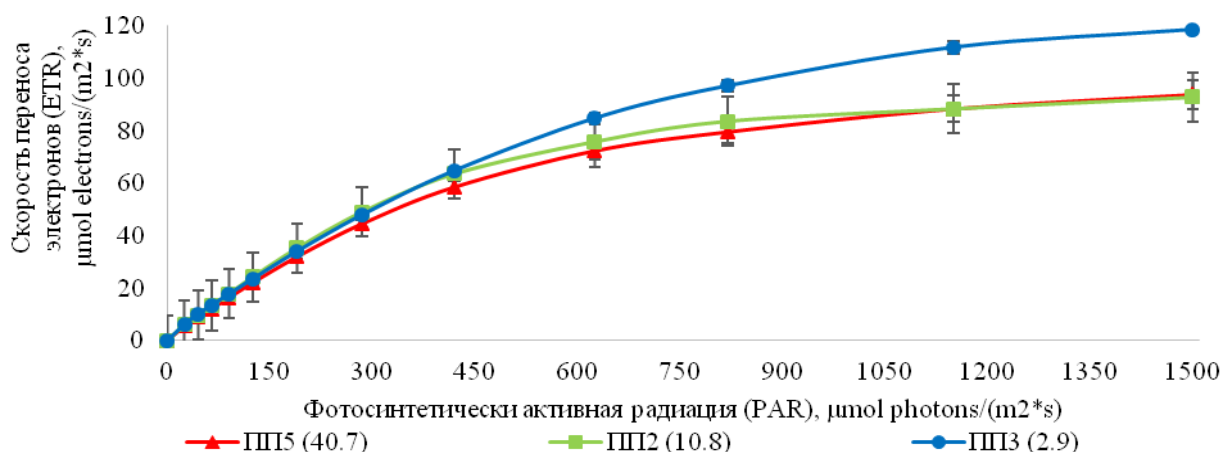


Рисунок 9 – Скорость переноса электронов (ETR) в зависимости от фотосинтетически активной радиации (PAR) хвои первого года жизни разногустотных сосновых молодняков в период вегетации

Хвоя второго года жизни (рисунок 10) в древостоях ПП3 и ПП2 демонстрировала равные значения ETR, тогда как в перегушенном древостое ПП5 показатель был ниже на 15% при максимальной интенсивности освещения. В целом можно констатировать, что древостои после рубок ухода характеризовались наибольшими значениями ETR, насаждения с умеренной конкуренцией (ПП2) занимали промежуточное положение, а древостои с обостренными конкурентными отношениями имели наименьшие значения.

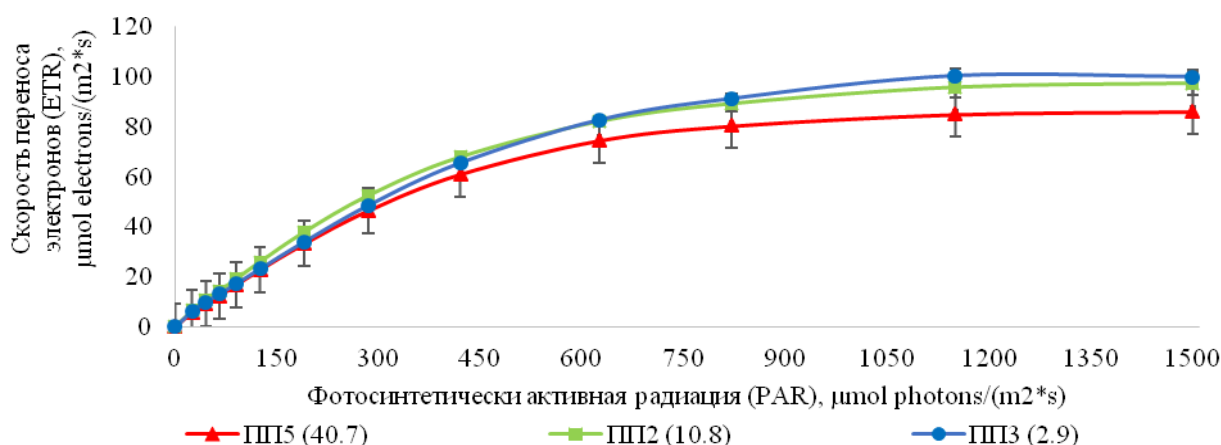


Рисунок 10 – Скорость переноса электронов (ETR) в зависимости от фотосинтетически активной радиации (PAR) хвой второго года жизни разнотравных сосновых молодняков в период вегетации

#### Продуктивность и эффективность фотосинтетического аппарата.

Установлена зависимость эффективности работы ассимиляционного аппарата от густоты древостоя. Расчеты показали, что в древостоях, пройденных рубками ухода, одна тонна хвой обеспечивает прирост  $7 \text{ м}^3$  древесины. В насаждениях с начальной густотой 10.8 тыс. шт/га этот показатель составлял  $5.5 \text{ м}^3$ , а в максимально густых древостоях - всего  $4.7 \text{ м}^3$ .

Выявленные различия имеют фундаментальное физиологическое обоснование: более высокая эффективность работы ассимиляционного аппарата и большая продолжительность его жизни в изреженных насаждениях позволяют дереву направлять больше продуктов фотосинтеза на формирование ценной стволовой древесины, а не на постоянное восполнение ассимиляционного аппарата.

## Глава 5. Оценка депонирования углерода фитомассой молодняков

Проведена сравнительная оценка углероддепонирующей функции молодняков сосны обыкновенной в зависимости от интенсивности конкурентных отношений в двух природных зонах: лесостепной (стационар "Погорельский бор") и средней тайги (район обсерватории ZOTTO).

Динамика депонирования в лесостепной зоне: Установлено, что в перегушенных древостоях (ПП5) наибольшее ежегодное поглощение  $\text{CO}_2$  наблюдается до 17-летнего возраста, с последующим снижением. В варианте с меньшей конкуренцией (ПП2) отмечен устойчивый рост депонирования, с превышением показателей контроля к 18 годам. На участке с рубками ухода (ПП3) зафиксированы наименьшие значения депонирования в возрасте до 18 лет, однако в дальнейшем наблюдается его практически линейный рост с превышением контроля в 19 лет и выходом на уровень ПП2 к 22 годам (рисунок 11).

Динамика депонирования в средней тайге: для среднетаежных молодняков (ППZ) показано, что максимальная интенсивность депонирования  $\text{CO}_2$  древесной фитомассой в 18-летнем возрасте достигает 8.5 т/га/год. Статистически значимых различий в депонировании  $\text{CO}_2$  между вариантами ППZ с разной густотой не выявлено.

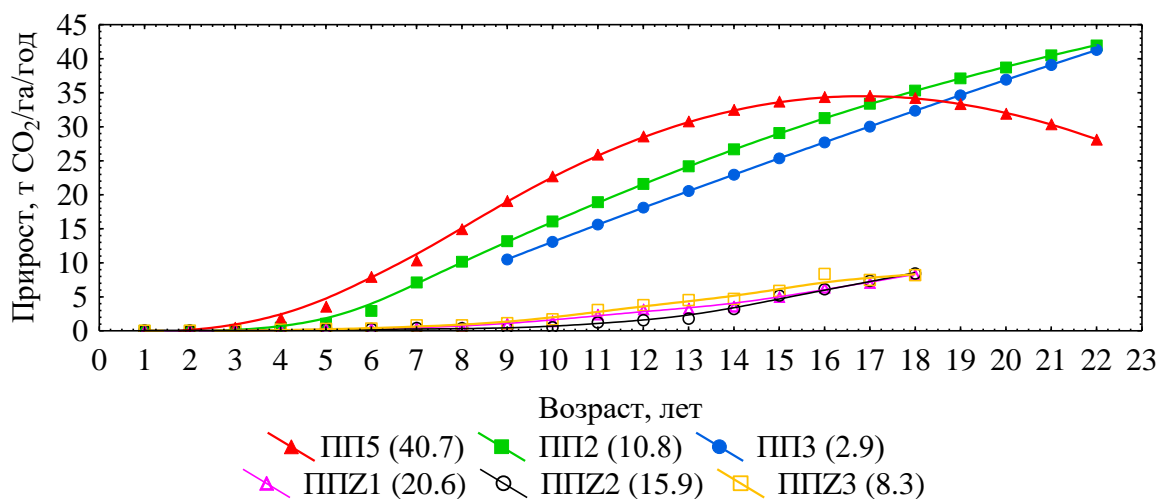


Рисунок 11 – Депонирование  $\text{CO}_2$ , рассчитанное по данным фитомассы

Проведенное исследование выявило значительные различия в углероддепонирующей способности сосновых молодняков разных природных зон. Установлено, что уровень депонирования  $\text{CO}_2$ , достигаемый среднетаежными сосняками к 18 годам, в лесостепных условиях наблюдается уже в возрасте 6-7 лет, что подчеркивает более высокую продуктивность лесостепных экосистем.

На рисунке 12 представлены данные по суммарному приросту всех фракций в т  $\text{CO}_2/\text{га}/\text{год}$ , за 22 летний период для лесостепи и 18 летний период зоны средней тайги.

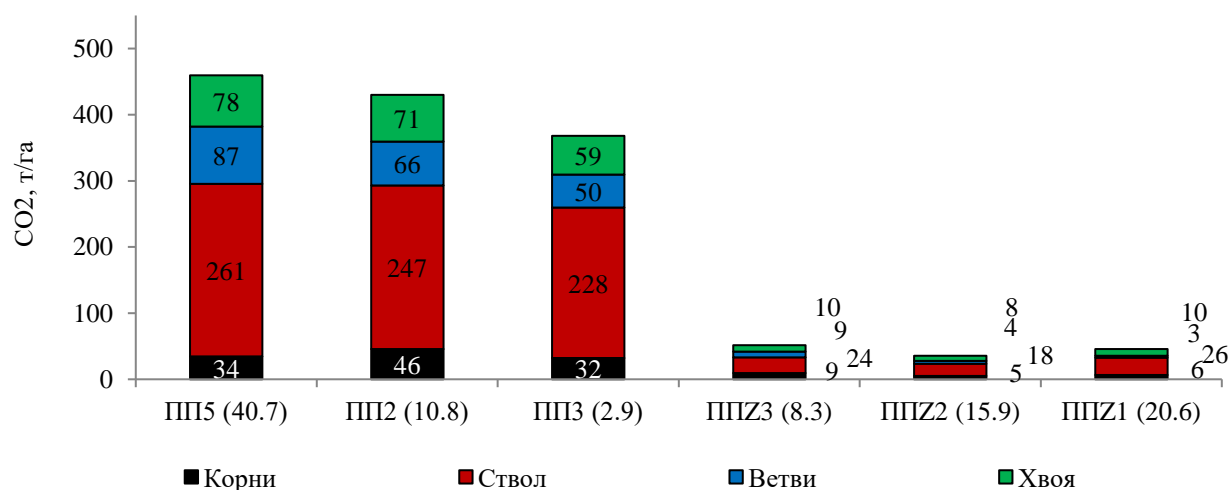


Рисунок 12 – Суммарное количество депонированного  $\text{CO}_2$  за период измерений

Анализ распределения депонированного углерода по фракциям фитомассы показал, что в лесостепной зоне наибольшая доля накопленного диоксида углерода приходится на стволовую часть и составляет 57-62% от общего пула. Важным методическим аспектом является подтверждение необходимости учета всей фитомассы, а не только стволовой древесины, для адекватной оценки вклада лесных экосистем в углеродный баланс.

Традиционный подход, учитывающий только стволовую массу, занижает реальные значения депонирования  $\text{CO}_2$  на 32-56%, что имеет критическое значение при разработке и реализации лесоклиматических проектов, включая создание карбоновых ферм и торговлю углеродными единицами.

## Выводы

1. Полученные результаты свидетельствуют о том, что наибольший прирост древесины на ранних этапах роста сосновых молодняков в Красноярской лесостепи характерен для перегущенных насаждений который достигает 18-19 м<sup>3</sup>/га. Однако, начиная 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, достигая к 22 годам 21 и 25 м<sup>3</sup>/га соответственно.

2. Рубки ухода изменяют распределение прироста между компонентами фитомассы: доля стволовой массы в общем приросте возрастает до 64 %, тогда как в перегущенных насаждениях к 20 годам она снижается до 44 %. Максимальный прирост корней после 11–12 лет отмечен в насаждениях с низкой исходной густотой, тогда как наибольший прирост ветвей и хвои характерен для перегущенных древостоев. Такой эффект следует рассматривать как компенсационную реакцию на жесткую внутривидовую конкуренцию при которой наблюдается интенсивный отпад ветвей и сокращение продолжительности жизни хвои.

3. Выявлена разнонаправленная динамика прироста хвои и стволов: в перегущенных насаждениях увеличение прироста хвои сопровождается снижением прироста древесины; после рубок ухода, напротив, прирост хвои снижается, а прирост стволов возрастает. Экспериментально установлено, что это обусловлено различиями в эффективности работы фотосинтетического аппарата (разница до 18 % в период вегетации). В разреженных древостоях выше эффективность утилизации световой энергии (ETR) и совершеннее механизмы регулируемой фотозащиты (NPQ), благодаря чему одна тонна хвои обеспечивает 7 м<sup>3</sup> прироста стволовой древесины против 4,7 м<sup>3</sup> в перегущенных.

4. Наибольшее депонирование CO<sub>2</sub> в возрасте до 17 лет характерно для перегущенных древостоев и достигает 34 тонны CO<sub>2</sub>/га в год. Однако в последующие 5 лет этот показатель начинает снижаться, тогда как в древостоях с

меньшей густотой, включая варианты с рубками ухода, депонирование  $\text{CO}_2$  увеличивается, достигая 42 и 41 тонны  $\text{CO}_2/\text{га}$  в год соответственно. Учет только стволовой древесины занижает реальное депонирование углерода на 32–56 %, а вклад нестволовых фракций в молодом возрасте достигает 43 %

5. Регулирование густоты сосновых молодняков на бывших сельскохозяйственных землях позволяет в зависимости от целевого назначения лесов формировать либо карбоновые фермы (с максимальным депонированием углерода), либо промышленные плантации (ориентированные на заготовку различных сортиментов древесины).

## Список основных работ, опубликованных по теме диссертации

### В изданиях, рекомендованных ВАК:

1. **Арясов, В. Е.** Структура фракционного прироста фитомассы разногустотных сосновых молодняков Красноярской лесостепи / В. Е. Арясов, А. А. Онучин // Сибирский лесной журнал. 2025. № 4. С.3-12. DOI: 10.15372/SJFS20250401

2. Онучин, А. А. Специфика прироста разногустотных сосновых молодняков Красноярской лесостепи в контексте эффективности работы ассимиляционного аппарата / А. А. Онучин, **В. Е. Арясов**, А. М. Шемберг // Сибирский лесной журнал. – 2024. – № 5. – С. 28-34. – DOI 10.15372/SJFS20240503. – EDN VIYNRD.

### В прочих изданиях:

3. Onuchin, A. A. Ways to Create Forest Carbon Farms to Achieve Carbon Neutrality and Climate Regulation / A. A. Onuchin, I. M. Danilin, **V. E. Aryasov** // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. – 2024. – Т. 60. – №. Suppl 3. – С. S422-S427.

4. **Арясов, В. Е.** Потенциал фотосинтеза сосновых молодняков в ранневесенний период / В. Е. Арясов // Молодые ученые в решении актуальных проблем науки: Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (с международным участием), Красноярск, 20–21 апреля 2023 года. – Красноярск: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева", 2023. – С. 42-44. – EDN RXPLKV.

5. **Арясов, В. Е.** Фотоассимиляционная активность сосновых молодняков различной густоты Центральной Сибири / В. Е. Арясов, А. М. Шемберг, Д. А. Полосухина, А. В. Панов // XV Сибирское совещание и школа молодых ученых по климато-экологическому мониторингу: материалы докладов всероссийской конференции с международным участием, Томск, 17–20 октября 2023 года /

Институт мониторинга климатических и экологических систем Сибирского отделения РАН. – Томск, 2023. – С. 119-122. – EDN OKJCZB.

6. **Арясов, В. Е.** Потенциал фотосинтеза сосновых молодняков в период вегетации / В. Е. Арясов, А. М. Шемберг // IV Всероссийская отчетная конференция магистрантов, аспирантов и молодых учёных-грантодержателей Красноярского краевого фонда науки и II Съезд советов молодых учёных и специалистов Енисейской Сибири, Красноярск, 5–6 октября 2023 года / Красноярский краевой фонд науки, 2023. – С. 123-126.

7. **Арясов, В. Е.** Специфика формирования фитомассы в разнотравных сосновых молодняках Красноярской лесостепи / В. Е. Арясов // Междисциплинарная конференция молодых учёных ФИЦ КНЦ СО РАН (КМУ-XXIV) : тезисы докладов, Красноярск, 29 апреля 2021 года. — Красноярск : ИФ СО РАН, 2021. — С. 63.

8. **Арясов, В. Е.** Взаимосвязь густоты и эффективности фотосинтезирующего аппарата сосновых молодняков в условиях юга Арктики / В. Е. Арясов // Междисциплинарная конференция молодых учёных ФИЦ КНЦ СО РАН (КМУ-XXVI) : тезисы докладов, Красноярск, 16 мая 2023 года. — Красноярск : ФИЦ КНЦ СО РАН, 2023. — С. 56.

9. **Арясов, В. Е.** Особенности формирования фитомассы в разнотравных сосновых молодняках средней Сибири / В. Е. Арясов // Междисциплинарная конференция молодых учёных ФИЦ КНЦ СО РАН (КМУ-XXVII) : тезисы докладов, Красноярск, 18 апреля 2024 года. — Красноярск : ИФ СО РАН, 2024. — С. 48.