

Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр СО РАН»  
Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН

ISSN 2311-1410

# Сибирский лесной журнал

Номер 3  
Май–Июнь 2022



Издательство СО РАН  
Новосибирск

FEDERAL RESEARCH CENTER KRASNOYARSK SCIENTIFIC CENTER  
RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES, SIBERIAN BRANCH  
V. N. SUKACHEV INSTITUTE OF FOREST  
RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES, SIBERIAN BRANCH

## **SIBERIAN JOURNAL OF FOREST SCIENCE**

Number 3 May–June 2022

Peer-reviewed Scientific Journal. Established January 2014

**Founder:** Federal Research Center Krasnoyarsk Scientific Center, Russian Academy of Sciences, Siberian Branch

**Published bimonthly**, 6 times per year  
ISSN 2311-1410 (Print), ISSN 2312-2099 (Online)

### **Editor-in-Chief**

Alexander A. Onuchin  
onuchin@ksc.krasn.ru

### **Associate Editors-in-Chief**

Igor M. Danilin, Tamara S. Sedel'nikova  
danilin@ksc.krasn.ru, tss@ksc.krasn.ru

### **Managing Editor**

Larisa N. Skripal'schikova  
lara@ksc.krasn.ru

### **Associate Editors**

Galina F. Antonova (RF), Natalia E. Antonova (RF), Stanislav P. Arefyev (RF), Sezgin Ayan (Turkey), Vladimir F. Baginskiy (Belarus), Eugene V. Banaev (RF), Yuri N. Baranchikov (RF), Kirsten Barrett (UK), Sergei A. Bartalev (RF), Sergei M. Bebiya (Abkhazia), Vera E. Benkova (RF), Kapitolina S. Bobkova (RF), Jiquan Chen (USA), Tumen N. Chimitdorziev (RF), Chimidnyam Dorjsuren (Mongolia), Chultem Dugarjav (Mongolia), Alexey A. Dymov (RF), Steve Eubanks (USA), Sergey N. Goroshkevich (RF), Irina D. Grodnitskaya (RF), Andrei N. Gromtsev (RF), Georg Guggenberger (Germany), Alexander P. Isaev (RF), Galina A. Ivanova (RF), Vladislav N. Kalaev (RF), Olga V. Kalugina (RF), Vyacheslav I. Kharuk (RF), Alexander V. Kirdyanov (RF), Natal'ya I. Kirichenko (RF), Grigoriy B. Kofman (RF), Alexander P. Kovalev (RF), Yuri N. Krasnoshchekov (RF), Konstantin V. Krutovsky (RF, Germany), Alexander M. Kryshen (RF), Konstantin N. Kulik (RF), Andrei N. Kupriyanov (RF), Qinglin Li (Canada), Sune Linder (Sweden), Sergei R. Loskutov (RF), Tatyana A. Moskalyuk (RF), Elena N. Muratova (RF), Sergei V. Osipov (RF), Igor N. Pavlov (RF), Heli Peltola (Finland), Viliam Pichler (Slovakia), Alexander V. Pimenov (RF), Anatoly S. Prokushkin (RF), Valery P. Putenikhin (RF), Olga A. Shapchenkova (RF), Dmitriy G. Schepaschenko (RF, Austria), Christiane Schmuilius (Germany), Olga V. Shergina (RF), Alexander S. Shishikin (RF), Svetlana D. Shlotgauer (RF), Anatoly Z. Shvidenko (RF, Austria), Vladimir A. Sokolov (RF), Vladislav G. Soukhovolsky (RF), Ge Sun (USA), Vyacheslav V. Tarakanov (RF), Alexander N. Tashev (Bulgaria), Elena E. Timoshok (RF), Josef Urban (Czechia), Vladimir V. Usenya (Belarus), Vladimir A. Usoltscev (RF), Eugene A. Vaganov (RF), Viktor I. Voronin (RF), Chuankuan Wang (China), Adam X. Wei (Canada), Vasily T. Yarmishko (RF)

### **Leading Editor**

Tatyana A. Nikitina

### **Scientific Editor**

Kseniya A. Kryukova

### **Technical Editor**

Tatyana R. Pantyukhina

### *Address for journal office:*

Russian Federation, 660036, Krasnoyarsk, Akademgorodok, 50/28  
Federal Research Center Krasnoyarsk Scientific Center, Russian Academy of Sciences, Siberian Branch  
V. N. Sukachev Institute of Forest, Russian Academy of Sciences, Siberian Branch  
Editorial office for the Siberian Journal of Forest Science  
Phones: +7 (391) 249-4639; +7 (391) 290-5516; E-mail: lara@ksc.krasn.ru  
Web: sibjforsci.com; сибирскийлеснойжурнал.рф

Novosibirsk

Siberian Branch of the Russian Academy of Science

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ НАУЧНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР  
«КРАСНОЯРСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК»  
ИНСТИТУТ ЛЕСА ИМ. В. Н. СУКАЧЕВА СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК –  
ОБОСОБЛЕННОЕ ПОДРАЗДЕЛЕНИЕ ФИЦ КНЦ СО РАН (ИЛ СО РАН)

## СИБИРСКИЙ ЛЕСНОЙ ЖУРНАЛ

№ 3 2022 Май–Июнь

Научный журнал. Издаётся с января 2014 г.

**Учредитель:** Федеральное государственное бюджетное научное учреждение  
Федеральный исследовательский центр  
«Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук»

**Периодичность** – 6 номеров в год  
ISSN 2311-1410 (печатное издание), ISSN 2312-2099 (сетевое издание)

*Главный редактор*  
А. А. Онучин

### Редакционная коллегия:

Г. Ф. Антонова (РФ), Н. Е. Антонова (РФ), С. П. Арефьев (РФ), С. Аян (Турция), В. Ф. Багинский (Беларусь),  
Е. В. Банаев (РФ), Ю. Н. Баранчиков (РФ), К. Баррет (Великобритания), С. А. Барталев (РФ), С. М. Бебия (Абхазия),  
В. Е. Бенькова (РФ), К. С. Бобкова (РФ), Е. А. Ваганов (РФ), Ч. Ван (Китай), А. Х. Вей (Канада), В. И. Воронин (РФ),  
С. Н. Горошкевич (РФ), И. Д. Гродницкая (РФ), А. Н. Громцев (РФ), Г. Гуггенбергер (Германия),  
И. М. Данилин (*зам. главного редактора*, РФ), Ч. Доржжурэн (Монголия), Ч. Дугаржав (Монголия), А. А. Дымов (РФ),  
Г. А. Иванова (РФ), А. П. Исаев (РФ), В. Н. Калаев (РФ), О. В. Калугина (РФ), А. В. Кирдянов (РФ), Н. И. Кириченко (РФ),  
А. П. Ковалев (РФ), Г. Б. Кофман (РФ), Ю. Н. Краснощеков (РФ), К. В. Крутовский (РФ, Германия), А. М. Крышень (РФ),  
К. А. Крюкова (*научный редактор*, РФ), К. Н. Кулик (РФ), А. Н. Куприянов (РФ), Ж. Ли (Канада), С. Линдер (Швеция),  
С. Р. Лоскутов (РФ), Т. А. Москалюк (РФ), Е. Н. Муратова (РФ), Т. А. Никитина (*ведущий редактор*, РФ), С. В. Осипов (РФ),  
И. Н. Павлов (РФ), Х. Пелтола (Финляндия), А. В. Пименов (РФ), В. Пихлер (Словакия), А. С. Прокушкин (РФ),  
В. П. Путенихин (РФ), Т. С. Седельникова (*зам. главного редактора*, РФ), Л. Н. Скрипальщикова (*отв. секретарь*, РФ),  
В. А. Соколов (РФ), Г. Сун (США), В. Г. Суховольский (РФ), В. В. Тараканов (РФ), А. Н. Ташев (Болгария),  
Е. Е. Тимошок (РФ), Й. Урбан (Чехия), В. В. Усень (Беларусь), В. А. Усольцев (РФ), В. И. Харук (РФ), Д. Чен (США),  
Т. Н. Чимитдоржиев (РФ), О. А. Шапченкова (РФ), А. З. Швиденко (РФ, Австрия), О. В. Шергина (РФ), А. С. Шишикин (РФ),  
С. Д. Шлотгауэр (РФ), К. Шмуллиус (Германия), Д. Г. Щепашенко (РФ, Австрия), С. Юбанк (США), В. Т. Ярмишко (РФ)

*Адрес редакции:* 660036, Красноярск, Академгородок, 50/28, ИЛ СО РАН  
Федеральное государственное бюджетное научное учреждение  
Федеральный исследовательский центр  
«Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук»  
Институт леса им. В. Н. Сукачева Сибирского отделения Российской академии наук –  
обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН (ИЛ СО РАН)

Редакция «Сибирского лесного журнала»  
Телефоны: (391) 249-4639; (391) 290-5516  
E-mail: lara@ksc.krasn.ru  
Интернет-сайт: [сибирскийлеснойжурнал.рф](http://сибирскийлеснойжурнал.рф), [sibjforsci.com](http://sibjforsci.com)

Новосибирск  
Федеральное государственное бюджетное учреждение «Сибирское отделение Российской академии наук»

© Федеральное государственное бюджетное научное учреждение Федеральный исследовательский центр  
«Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук», 2022  
© Институт леса им. В. Н. Сукачева Сибирского отделения Российской академии наук –  
обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН (ИЛ СО РАН), 2022



### Основная тематика журнала:

лесоведение, лесоводство, лесоустройство и лесная таксация  
структура, динамика и функционирование лесных экосистем  
биосферные функции леса, их изменения под влиянием глобальных и региональных  
климатических процессов и антропогенных воздействий  
география, экология и типология лесов  
лесная генетика, селекция и интродукция, дендрология  
лесное ресурсоведение, этноботаника  
лесные культуры  
физиология и биохимия лесных растений  
биотехнология, древесиноведение, химическая переработка древесины и недревесных продуктов леса  
дендрохронологические исследования  
лесная гидрология  
лесная пирология  
лесные зоокомплексы  
лесная фитоценология  
лесное почвоведение  
лесная микробиология  
лесная фитопатология и защита леса  
лесомелиорация и лесная рекультивация  
лесная политика, экономика, управление лесами, лесное законодательство  
дистанционные и геоинформационные методы в оценке биосферных функций леса

Журнал представляет собой мультидисциплинарное рецензируемое научное издание, освещающее широкий спектр вопросов лесоведения, лесоводства, лесоустройства, лесной таксации, генетики и селекции, лесной экологии и экономики – наук о сложнейших закономерностях структуры, формирования и развития лесных экосистем и использования лесных ресурсов человеком.

«Сибирский лесной журнал. Siberian Journal of Forest Science» (ISSN 2311-1410 (печатное издание), ISSN 2312-2099 (сетевое издание)) публикуется Федеральным государственным бюджетным учреждением «Сибирское отделение Российской академии наук» на русском и английском языках.

«Сибирский лесной журнал» включен в российскую систему научного цитирования eLibrary.ru (РИНЦ), международные реферативные базы данных: Ulrichsweb: Global Serials Directory, Directory of Open Access Journals (DOAJ), AGRIS, CABI Forest Science Database, перечень периодических научных изданий ВАК при Минобрнауки РФ, готовится к включению в международные реферативные базы данных научной периодики и цитирования: Springer, Scopus, Web of Science. Полнотекстовые статьи размещаются на сайте журнала в сети: [sibirskiiлеснойжурнал.рф](http://sibirskiiлеснойжурнал.рф), [sibjforsci.com](http://sibjforsci.com).

«Сибирский лесной журнал» предполагает следующие разделы: «Обзорные статьи», «Исследовательские статьи», «Краткие сообщения», «Рецензии», «Хроника», «Международное сотрудничество». В нем освещаются самые разные вопросы, касающиеся проблем биологического разнообразия лесов на всех уровнях его организации (генетическом, видовом, экосистемном). Публикуются статьи по антропогенной и техногенной трансформации лесных экосистем. Журнал не ограничивается лесными проблемами Сибири, принимает и публикует материалы из различных регионов мира, представляющие общенаучный интерес.

Подготовлено к печати Федеральным государственным бюджетным учреждением  
«Сибирское отделение Российской академии наук»

Ведущий редактор Т. А. Никитина

Научный редактор К. А. Крюкова

Дизайн обложки С. Р. Лоскутов

Техническое редактирование и верстка Т. Р. Пантюхина

---

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор). Свидетельство о регистрации средства массовой информации:

Периодическое печатное издание, журнал – ПИ № ФС 77-68699 от 09 февраля 2017 г.

Сетевое издание – ЭЛ № ФС 77-70737 от 15 августа 2017 г.

Учредитель: Федеральное государственное бюджетное научное учреждение

Федеральный исследовательский центр

«Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук»

---

Сдано в набор 01.06.2022. Выход в свет 30.06.2022. Бумага типографская. Формат 60 × 84 1/8

Усл. печ. л. 7.9. Уч.-изд. л. 6.9. Тираж 100 экз. Заказ № 233. Цена свободная.

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Сибирское отделение Российской академии наук»  
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 17

Отпечатано в Федеральном государственном бюджетном учреждении «Сибирское отделение Российской академии наук»  
630090, г. Новосибирск, Морской просп., 2

Тел.: 8 (383) 330-8466; электронная почта: [e.lyannaya@sb-ras.ru](mailto:e.lyannaya@sb-ras.ru); <http://www.sibran.ru>

УДК 630

## ПРЕДИСЛОВИЕ НАУЧНОГО РЕДАКТОРА ТЕМАТИЧЕСКОГО НОМЕРА «СИБИРСКОГО ЛЕСНОГО ЖУРНАЛА»

**А. А. Онучин**

*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

*Поступила в редакцию 25.03.2022 г.*

Представлен краткий обзор содержания статей третьего тематического номера «Сибирского лесного журнала» 2022 г., посвященного лесоводственным проблемам Сибири и реализации климатических проектов.

**Ключевые слова:** *Сибирский лесной журнал, 2022, № 3, лесоводство, углерод депонирующие функции лесов, моделирование процессов роста насаждений, краткий редакторский обзор содержания тематического номера.*

DOI: 10.15372/SJFS20220301

Третий тематический номер 2022 г. «Сибирского лесного журнала» посвящен лесоводственным аспектам, углерод депонирующим функциям и моделированию процессов роста насаждений Сибири, что весьма актуально в связи с реализацией лесоклиматических проектов и отвечает интересам ведения лесного хозяйства на принципах устойчивого управления лесами с широким внедрением системы их интенсивного использования и воспроизводства. В номер, главным образом, вошли работы, выполненные сотрудниками лаборатории лесоведения и почвоведения Института леса им. В.Н. Сукачева СО РАН (ИЛ).

Важная лесоводственная проблема изучения реакции насаждений на изреживание и внесение удобрений, имеющая как теоретическое, так и практическое значение, обсуждается в статьях А. А. Онучина с соавторами. В результате экспериментов по проведению рубок ухода разной интенсивности и внесения удобрений в молодняках и средневозрастных сосновых насаждениях Красноярской лесостепи, сформировавшихся на бывших сельскохозяйственных землях, начальная плотность которых составляла более 30 тыс. шт./га, получены данные о реакции ценозов на комплексный уход. Предложены модели, отражающие зависимость прироста от

возраста, густоты насаждений и дозы вносимых удобрений. Установлено, что внесение удобрений позволяет снизить конкурентные отношения между деревьями за ресурсы среды, что позволяет перегущенным молоднякам обеспечивать максимально возможную продуктивность до определенного возраста. Полученные данные станут теоретической основой реализации модели интенсивного использования и воспроизводства лесов в лучших лесорастительных условиях, а также будут полезны при создании карбоновых ферм, основное назначение которых – снижение углеродного следа промышленных предприятий.

В статье Л. С. Пшеничниковой с соавторами рассматриваются особенности роста сосновых культур разной густоты в условиях южной тайги Сибири. Анализируется динамика таксационных показателей, отпада и прироста древесины 35-летних разногустотных культур сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), созданных в 1982 г. в Институте леса под руководством А. И. Бузыкина на бывших сельскохозяйственных землях в Большемурутинском районе Красноярского края. Приведена оценка влияния густоты деревьев на рост и продуктивность молодняков сосны в возрасте 2, 5, 12, 15, 20, 25, 30 и 35 лет. Показано, что на начальном этапе роста древостоев

наблюдается увеличение прироста с начальной густотой посадки, с выходом на плато при густоте свыше 70.0 тыс. шт./га. Установлена зависимость между текущим ежегодным приростом, возрастом сосновых культур, начальной густотой посадки и текущей густотой насаждений. Определено, что в результате снижения конкуренции вследствие самоизреживания перегущенных культур их прирост стал повышаться, однако темпы его роста отставали от таковых у культур с меньшей густотой начальной посадки. Сделан вывод о том, что высокие темпы депонирования углерода на начальном этапе создания культур повышенной густоты могут сохраняться при условии периодических уходов, регулирующих густоту насаждений.

В статье Р. С. Собачкина и соавторов обсуждаются особенности роста и продуктивности сосновых молодняков, сформированных из деревьев различного ценотического статуса. Представлены результаты формирования в Красноярской лесостепи насаждений из перегущенных 15-летних сосновых молодняков посредством проведения целевой рубки, направленной на снижение их густоты и сохранение в трех вариантах только деревьев определенного ценотического положения (господствующие, согосподствующие и угнетенные) с целью получения информации о возможном выравнивании таксационных показателей в процессе их роста. Установлено, что господствующие деревья после проведения рубки имели наилучшие показатели роста (среднюю высоту и средний диаметр) и сохранили эту тенденцию на протяжении всего периода наблюдений. Угнетенные деревья после проведения рубки проходили относительно долгий период адаптации, имели диспропорциональный рост в высоту и сниженный по диаметру.

В статье А. Н. Борисова, В. В. Иванова предложена имитационная модель роста сосновых древостоев, которая позволяет в условиях конкуренции за доступный ресурс рассчитать прирост по диаметру ствола для каждого дерева на моделируемом участке, а также производные таксационные показатели: густоту, полноту, запас стволовой древесины, и отследить динамику всех этих показателей с шагом в один год. Модель учитывает взаимное расположение деревьев в древостое, их размеры и количество доступного ресурса для каждого дерева. Верификация модели выполнена с использованием материалов многолетних исследований на постоянных пробных площадях, заложенных в молодняках,

средневозрастных и спелых древостоях. Рассмотрено несколько сценариев роста сосновых древостоев, изучено влияние рубок на динамику ряда показателей: среднего диаметра ствола и прироста по диаметру, среднего годового прироста, густоты древостоя, запаса стволовой древесины. Утверждается, что предложенная имитационная модель является эффективным инструментом изучения роста древостоев и служит альтернативой трудоемким натурным исследованиям, которые затруднительно реализовать на длительных временных интервалах.

В статье А. В. Лебедева, В. В. Кузьмичева (Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К. А. Тимирязева, г. Москва) предпринята попытка построения бонитетной шкалы с использованием обобщенного алгебраического разностного подхода. Данными для исследования послужили общие таблицы хода роста полных (нормальных) сосновых древостоев Северной Евразии. В общей сложности проанализированы 25 уравнений, полученных с помощью подхода GADA. Сравнительный анализ показал, что наилучшее качество выравнивания данных обеспечивает уравнение, основанное на функции Митчерлиха (известной также как Дракина – Вуевского, Чапмана – Ричардса) с заменой параметров, отвечающих за предельные значения высоты и форму кривой. Установлено, что ошибки модели зависят от временного интервала прогнозирования и уровня производительности древостоя. С ростом срока прогнозирования происходит увеличение ошибки. Рассмотренная в исследовании методика может быть применена для разработки моделей хода роста таксационных показателей других лесообразующих пород России.

В завершающей третий тематический номер «Сибирского лесного журнала» статье В. А. Усольцева, И. С. Цепордея (Ботанический сад УрО РАН, г. Екатеринбург) обсуждаются географические закономерности изменения базисной плотности древесины и коры лесообразующих пород Евразии. Отмечено, что квалиметрия надземной и подземной фитомассы деревьев является составной частью исследований биологической продуктивности и углерод депонирующей способности лесного покрова, необходимых для корректной оценки углеродного цикла в его пространственных градиентах и в связи с изменением климата. Установлено, что основная доля углерода депонируется в стволах деревьев и в значительной степени зависит от базисной плотности (БП) древесины и коры.

В работе использована обширная авторская база данных о квалиметрии лесообразующих видов Северной Евразии. Построенные модели смешанного типа, описывающие зависимости БП древесины и коры деревьев от их дендрометрических показателей, географических координат и видовой принадлежности деревьев, позволили выявить 0.25%-е снижение БП древесины на 1° с. ш. в направлении с юга на север и 0.26%-е на 1° в. д. в направлении с запада на восток. Выполнено ранжирование древесных видов равновеликих деревьев по БП, которое показало, что

каждый вид имеет специфическое соотношение БП древесины и коры.

В настоящем выпуске журнала отражены далеко не все лесоводственные аспекты функционирования насаждений, углерод депонирующих функций, моделирования процессов их формирования и роста. Тем не менее надеемся, что подготовленный выпуск позволит исследователям, интересующимся лесоводственными проблемами, получить новую информацию о важных как с теоретической, так и с практической точек зрения аспектах роста управляемых лесов.

*Научный редактор тематического номера  
«Сибирского лесного журнала»  
доктор биологических наук, профессор  
А. А. Онучин*

## **FOREWORD FROM THE SCIENTIFIC EDITOR FOR THEMATIC ISSUE OF THE SIBERIAN JOURNAL OF FOREST SCIENCE**

**A. A. Onuchin**

*V. N. Sukachev Institute of Forest, Russian Academy of Science, 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

The capsule review of the scientific editor for the thematic issue of the Siberian Journal of Forest Science, 2022, number 3 is done, dedicated to silvicultural problems in Siberia.

**Keywords:** *Siberian Journal of Forest Science, 2022, N. 3, silviculture, carbon sequestration functions of forests, modeling of stands' growth processes, brief editorial review of the thematic issue contents.*

**How to cite:** *Onuchin A. A. Foreword from the scientific editor for thematic issue of the Siberian Journal of Forest Science // Sibirskij Lesnoj Zurnal (Sib. J. For. Sci.). 2022. N. 3. P. 3–5 (in Russian with English abstract).*

## ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЕ СТАТЬИ

УДК 630\*562.2:631.841.7

### РЕАКЦИЯ СОСНОВЫХ МОЛОДНЯКОВ КРАСНОЯРСКОЙ ЛЕСОСТЕПИ НА ИЗРЕЖИВАНИЕ И ВНЕСЕНИЕ АЗОТНЫХ УДОБРЕНИЙ

А. А. Онучин, А. Е. Петренко, Д. С. Собачкин, Р. С. Собачкин

*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, alcorsci@bk.ru, dens@ksc.krasn.ru, romans@ksc.krasn.ru

*Поступила в редакцию 09.02.2022 г.*

В результате эксперимента по проведению рубок ухода разной интенсивности и внесения удобрений (карбамид, 46 % действующего вещества) в молодняках Красноярской лесостепи, сформировавшихся на бывших сельскохозяйственных угодьях, начальная густота которых составляла более 30 тыс. шт./га, получены данные о реакции ценозов на комплексный уход. Построены зависимости прироста от возраста и начальной густоты насаждений и от густоты и дозы удобрения. Показано, что при интенсивности разреживания 77 и 59 % по количеству деревьев через 10 лет необходимо проводить второй прием рубки ухода. Установлено, что отклик прироста на внесение удобрений наступает с 5-го года после их применения. Внесение удобрений позволяет снизить конкурентные отношения между деревьями за ресурсы среды, что позволяет перегушенным молоднякам обеспечивать максимально возможную продуктивность насаждения до определенного возраста. Полученные результаты могут быть использованы не только в решении лесоводственных задач по увеличению продуктивности насаждений, но и для повышения их углерод депонирующих функций.

**Ключевые слова:** рубки ухода, азотные удобрения, прирост, густота, запас

DOI: 10.15372/SJFS20220301

#### ВВЕДЕНИЕ

Среди задач, стоящих перед лесной наукой, наиболее актуален поиск оптимальных режимов лесовыращивания, которые обеспечивали бы максимальный прирост древесины и биомассы на единице площади в различных лесорастительных условиях. Продуктивность естественных древостоев в большинстве случаев не совпадает с их потенциально возможной. Причина этого заключается в конкурентных взаимоотношениях между деревьями за ресурсы среды, поэтому важным моментом в выращивании высокопродуктивных искусственных и естественных лесных насаждений является регулирование густоты, особенно на начальных этапах формирования древостоев, так как уже с первых лет

произрастания наблюдаются острые конкурентные взаимоотношения между растениями (Бузыкин, Пшеничникова, 1999).

Одним из путей повышения продуктивности древостоев считается проведение рубок ухода в разном возрасте. Целесообразность данного мероприятия обусловлена способностью лесной экосистемы к саморегуляции или ее устойчивостью, под которой понимают способность биологической системы сохранять свое состояние и функционирование при внешнем возмущении и при изменении системы, в том числе восстанавливать изъятую биомассу. Близкую к предельной некритической степени уменьшения биомассы можно считать мерой устойчивости (Новосельцев, 1978). В связи с этим представляют интерес допустимая степень разреживания, позволяю-

шая сохранить уровень продуктивности, и реакция древостоя на разреживание разной интенсивности (Сеннов, 1984).

Теоретические основы рубок ухода за лесом, изменение продуктивности, влияние на основные таксационные параметры древостоев и оценка экономической эффективности довольно хорошо освещены в литературе (Георгиевский, 1957; Воропанов, 1960; Савина, 1961; Изюмский, 1969; Давыдов, 1971; Полянский, Сеннов, 1975; Сеннов, 1977, 1984; Разин, Рогозин, 2010). Вместе с тем остается малоизученным вопрос, касающийся определения длительности эффекта рубок ухода в зависимости от интенсивности рубок ухода в молодняках и времени назначения последующего приема лесоводственного ухода. С учетом возраста и структуры молодняков целесообразно определение густотно-возрастных оптимумов продуктивности и интенсивности разреживания (Сеннов, 1984; Иванов и др., 2017; Онучин и др., 2022).

Другим способом повышения биологической продуктивности лесных насаждений является применение минеральных удобрений. Информация об отклике древесных ценозов на различные дозы минеральных удобрений важна для повышения их продуктивности, особенно в контексте реализации модели интенсивного использования и воспроизводства лесов (Мариничев, 2009; Федорев и др., 2018).

В этой связи будет интересен опыт проведения комплексного ухода – рубок ухода разной интенсивности и внесения минеральных удобрений для установления их эффективности и ее длительности и, в частности, для повышения углерод депонирующих функций насаждений.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследования проводились в экспериментальном хозяйстве «Погорельский бор» Института леса им. В. Н. Сукачева СО РАН, которое территориально входит в Красноярскую островную лесостепь. Абсолютные высоты здесь колеблются в пределах 250–300 м. Климат резко континентальный, умеренно-прохладный, средняя годовая температура 1.7 °С. Продолжительность вегетационного периода 144 дня. Среднегодовое количество осадков 470 мм, с колебаниями в отдельные годы 320–630 мм (Агроклиматический справочник, 1961). Почвы дерново-подзолистые и серые лесные (Боболева, 1968).

Первый блок эксперимента включает исследования в сосновых молодняках первого класса возраста (состав – 10С, тип леса – сосняк разнотравный), сформировавшихся на бывших сельскохозяйственных угодьях. В массиве молодняков были заложены три пробные площади (пп) размером 20 × 20 м, на которых впоследствии проведены рубки ухода разной интенсивности по количеству стволов: 93 % (пп 1 – редкая, 2.9 тыс. шт./га), 77 % (пп 2 – средняя, 9.5 тыс. шт./га) и 59 % (пп 3 – густая, 16.8 тыс. шт./га). На контроле (пп 4) размер пробной площади составлял 20 × 15 м, с начальной густотой деревьев 40.7 тыс. шт./га. При этом обеспечивалось наличие буферных зон шириной не менее 5 м по всему периметру пробных площадей с соответствующей густотой. Рубки ухода выполнялись в конце мая 2009 г. исходя из принципов равномерного распределения оставшихся деревьев по площади и удаления в первую очередь деревьев из низших ступеней толщины (оставшие в росте и угнетенные).

Исследования проводились по общепринятым методикам (Побединский, 1966; Моисеев, 1971). На каждой пп выполнен сплошной перебор деревьев с замером диаметров на высоте 1.3 м. Число деревьев на пп варьировало от 116 до 1220 шт. Для определения основных средних таксационных показателей ценозов на каждой пп подбирались по 25–30 шт. модельных деревьев исходя из принципов равномерно-ступенчатой представленности,

Второй блок эксперимента заложен в 2010 г. в лесорастительных условиях, сопоставимых с таковыми первого блока. В дополнение к рубкам ухода применялись азотные удобрения. При рубках в первую очередь удалялись деревья, оставшие в росте, имеющие небольшие размеры по высоте и диаметру. Изреживание проводилось равномерно по площади. Блок состоял из шести пп. Размер каждой пп 0.04 га (20 × 20 м), с оставлением буферных зон. На трех пп без проведения рубок ухода было только внесено азотное удобрение (У) (карбамид, 46 % действующего вещества – д.в.) в дозах 100 кг д.в./га (У 100), 200 кг д.в./га (У 200) и 300 кг д.в./га (У 300). Начальная густота ценозов на пп с внесением удобрений на У 100 составляла 31.75 тыс. шт./га, на У 200 – 21.75 тыс., на У 300 – 27.45 тыс. шт./га. На других трех пп был внесен карбамид в тех же концентрациях и дозах соответственно и проведены рубки ухода (Р) – РУ 100, 200 и 300 с интенсивностью 30–50 % по количеству стволов. Густота ценозов после прореживания на

**Таблица 1.** Таксационная характеристика молодняков с уходами

Пп	Средний возраст, лет	Густота, шт./га	Средний диаметр, см	Средняя высота, м	Запас, м <sup>3</sup> /га	Сумма площадей поперечных сечений, м <sup>2</sup> /га	Полнота
Редкая	18	2900	11.1	8.7	129	28.10	1.1
Средняя	18	8575	7.1	8.1	168	33.52	1.4
Густая	18	11850	5.9	8.1	167	32.16	1.3
РУ 300	18	9225	7.4	8.4	197	40.06	1.6
РУ 200	18	8300	8.0	8.7	204	42.12	1.7
РУ 100	18	9075	7.2	8.3	184	36.86	1.5
У 300	18	15175	5.8	7.8	207	39.68	1.6
У 200	18	12250	6.7	8.1	215	42.66	1.7
У 100	18	14050	5.9	7.7	195	38.59	1.6
Контроль	18	19333	5.2	7.7	211	40.70	1.7

РУ 100 составляла 14.00 тыс. шт./га, на РУ 200 – 10.65 тыс., на РУ 300 – 13.15 тыс. шт./га. На каждой пп проведен сплошной пересчет деревьев с обмером основных таксационных показателей у 25–30 шт. модельных деревьев по общепринятым в лесоводстве методикам. В табл. 1 приведены средние таксационные показатели через 10 лет после проведения уходов в первом и через 9 лет во втором блоках эксперимента.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

*Первый блок.* До проведения рубок ухода молодняки сосны представляли собой чрезмерно загущенные ценозы. Средний диаметр деревьев составлял 1.9 см, средняя высота 2.1 м. Крона большинства деревьев плохо развита, ее средняя протяженность равна 1.0 м. 80 % всех деревьев находились в наименьшей степени толщины (1 см), и лишь 5.0 % имели диаметр 3.0 см и более. На всех пп, где были проведены рубки ухода, независимо от их интенсивности распределение деревьев по диаметру приблизилось к нормальному (имеет вид колоколообразных кривых) (рис. 1, а).

Таким образом, рубки ухода в сосновых молодняках, изначально очень сильно загущенных (около 30 тыс. шт./га), позволили существенно снизить конкуренцию между деревьями. Молодняки получили возможность активного дальнейшего роста и продуцирования биомассы. Однако в последующие годы отмечается снижение их эффекта, замедление ростовых процессов. Молодняки с интенсивностью рубки 59 и 77 % уже через 5 лет нуждались в повторной корректировке их структуры рубками ухода, поскольку стали обостряться конкурентные отношения, что потенциально сказывалось на снижении общей

продуктивности древостоев (Разин, Рогозин, 2010; Пшеничникова и др., 2022).

После проведения рубок ухода наименьшее значение среднего диаметра деревьев отмечалось на контроле и составляло 1.9 см, наибольшее – в редкой по густоте пп – 3.5 см, в средней и густой пп – 2.9 и 2.5 см соответственно (рис. 2, а).

Наименьший средний диаметр деревьев на контроле объясняется наличием значительной доли угнетенных деревьев, тогда как в редкой по густоте пп при максимальной интенсивности разреживания были оставлены преимущественно деревья, имеющие максимальные диаметры стволов деревьев и высоту и хорошо развитую крону.

Через 3 года после проведения рубок густота деревьев на контроле снизилась до 36.5 тыс. шт./га, густота ценозов не изменилась. Наименьшее значение среднего диаметра по-прежнему отмечалось на контроле и составляло 2.8 см, наибольшее – в редкой по густоте пп – 6.2 см, что в 2.3 раза больше по сравнению с контролем. Средний диаметр в средней по густоте пп составлял 4.5 см, что в 1.6 раз больше по сравнению с контролем, в густой пп – 3.5 см, в 1.3 раза больше, чем на контроле.

Через 5 лет после проведения рубок густота деревьев на контроле снизилась до 34.2 тыс. шт./га, густота разреженных ценозов не изменилась. Наименьшее значение среднего диаметра отмечалось на контроле и составляло 3.3 см, наибольшее – в редкой по густоте пп – 8.0 см, в 2.4 раза больше по сравнению с контролем. Средний диаметр в средней по густоте пп был равен 5.4 см, в 1.6 раз больше по сравнению с контролем, в густой пп – 4.2 см, в 1.3 раза больше, чем на контроле. Наибольший относительный прирост

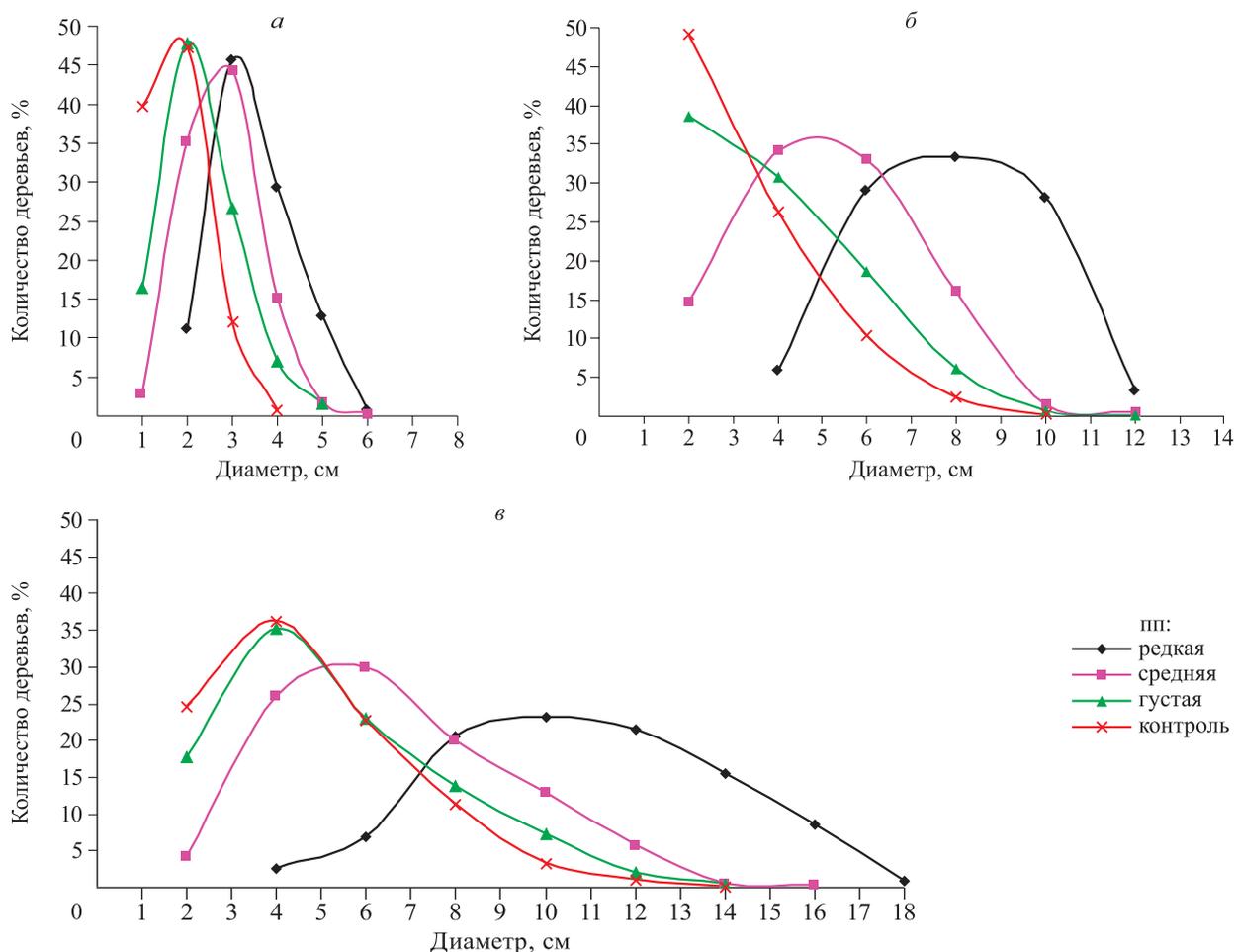


Рис. 1. Распределение относительного количества деревьев в сосновых молодняках по диаметру после рубки (а), через 5 (б) и 10 (в) лет.

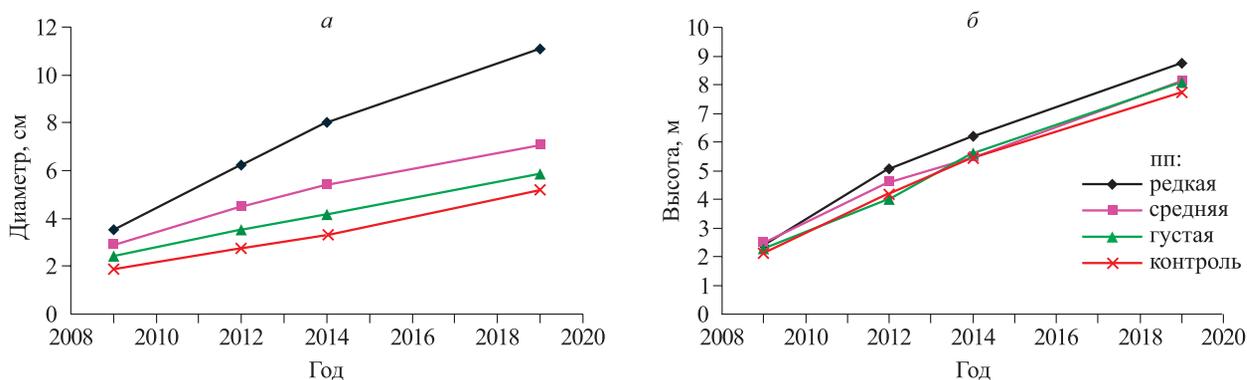


Рис. 2. Таксационные показатели в сосновых молодняках после рубок ухода.

по диаметру за 5-летний период после проведения рубок ухода отмечался в редкой по густоте пп – в 2.3 раза, приросты в средней, густой пп и на контроле были примерно одинаковыми: в 1.9, 1.7, 1.8 раза соответственно. Через 10 лет после рубок диаметр относительно контроля немного уменьшился по сравнению с предыдущим периодом: в 2.2, 1.4, 1.1 раза соответственно для

редкой, средней и густой пп. Относительный прирост за второй 5-летний период уменьшился в 1.3–1.4 раза для пп с проведенными рубками и в 1.6 раза на контроле.

После проведения рубок ухода наименьшее значение средней высоты деревьев в ценозах отмечалось на контроле и составляло 2.1 м, наибольшее – в средней по густоте пп – 2.5 м,

в редкой и густой пп – 2.4 и 2.3 м соответственно (рис. 2, б). Наименьшее значение средней высоты деревьев на контроле объясняется наличием значительной доли угнетенных невысоких деревьев.

Через 3 года после проведения рубок наименьшая средняя высота деревьев была в густой пп и составляла 4.0 м, наибольшая – в редкой и средней по густоте пп – 5.0 и 4.6 м соответственно, на контроле – 4.2 м.

Через 5 лет после проведения рубок наименьшее значение средней высоты деревьев отмечалось на контроле и средней по густоте пп – 5.5 и 5.4 м соответственно, наибольшее – в редкой по густоте пп – 6.2 м, в густой пп – 5.6 м. Наибольшие приросты в высоту были в редкой по густоте пп и на контроле – в 2.6 раза, наименьшие – в средней – в 2.2 раза, в густой пп – в 2.5 раза. Через 10 лет после рубки высота относительно контроля не изменилась. Относительный прирост за второй 5-летний период уменьшился в 1.42–1.49 раз для всех пп.

Прирост по запасу – одна из ключевых характеристик древостоев. Его увеличение может рассматриваться как критерий оценки обоснованности и успешности проведения лесохозяйственных мероприятий. Помимо практического аспекта, связанного с продуктивностью насаждений, увеличение прироста по запасу означает и увеличение депонирования углерода лесными экосистемами – реализацией одной из актуальных задач современности.

В результате обработки исходных данных методом множественного регрессионного анализа получена зависимость прироста от возраста и начальной густоты насаждений, которая выражается следующим уравнением:

$$P = -19.21 + 3.83 \times A - 0.1 \times A^2 + 0.039 \times A \times N - 0.0018 \times A^2 \times N, \quad (1)$$

$$R^2 = 0.97; \sigma = 1.31; F = 79.81,$$

где  $P$  – текущий периодический прирост,  $\text{м}^3/(\text{га} \cdot \text{год})$ ;  $A$  – возраст насаждения, лет;  $N$  – густота древостоя на начало эксперимента, тыс. шт./га;  $R^2$  – коэффициент множественной детерминации;  $\sigma$  – стандартная ошибка уравнения,  $\text{м}^3/(\text{га} \cdot \text{год})$ ;  $F$  – критерий Фишера

Графическая форма модели (1) дает наглядное представление об изменении среднего годовичного прироста сосновых молодняков в различных вариантах опыта с возрастом. Анализ динамики прироста сосновых молодняков с различной начальной степенью изреживания свидетельствует о том, что с 9 до 14 лет прирост

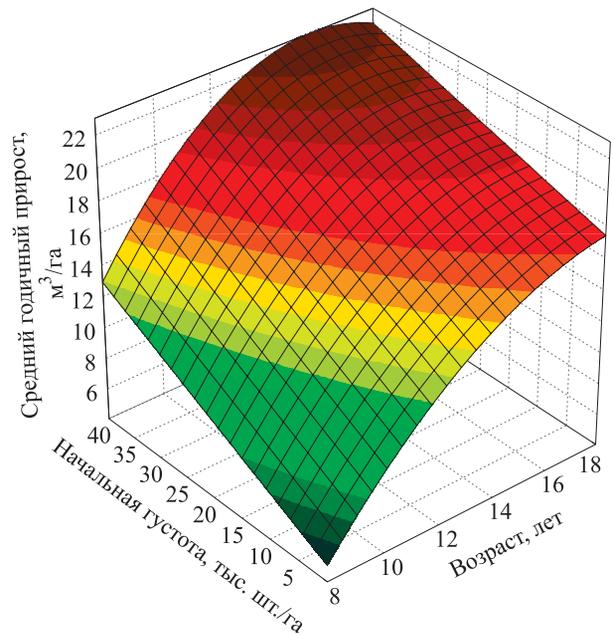


Рис. 3. Зависимость прироста от возраста и густоты на начало эксперимента.

увеличивается примерно одинаковыми темпами во всех вариантах опыта, включая контроль, где изреживание не проводилось. По истечении этого периода времени на контроле и в насаждении с минимальной интенсивностью изреживания темпы прироста снижаются, тогда как в вариантах опыта со средней и высокой степенью изреживания остаются практически прежними (рис. 3).

Таким образом, в перегушенных сосновых молодняках без проведения рубок ухода средний годичный прирост достигает максимума ( $22 \text{ м}^3/\text{га}$ ) в возрасте 15–17 лет, а затем начинает снижаться (рис. 3). Несмотря на некоторое снижение прироста перегушенных молодняков после 17-летнего возраста, с точки зрения аккумуляции углерода они будут предпочтительнее разреженных ценозов, хотя с возрастом эта тенденция может измениться кардинальным образом (Онучин и др., 2022).

На основе сплошных перечетов деревьев на пробных площадях в сезоны 2009, 2012, 2014 и 2019 гг. была построена динамика запасов, а по полученным уравнениям регрессионных зависимостей восстановлены недостающие ежегодные значения запасов за 2009–2019 г. (рис. 4, а). Далее была рассчитана удельная продуктивность ( $\text{м}^3/\text{га}$ ), которая определяется отношением

$$Z = \frac{\Delta M}{M} \times 100 \%, \quad (2)$$

где  $\Delta M$  – прирост по запасу за текущий год,  $\text{м}^3/\text{га}$ ;  $M$  – весь запас древостоя на данный момент,  $\text{м}^3/\text{га}$ .

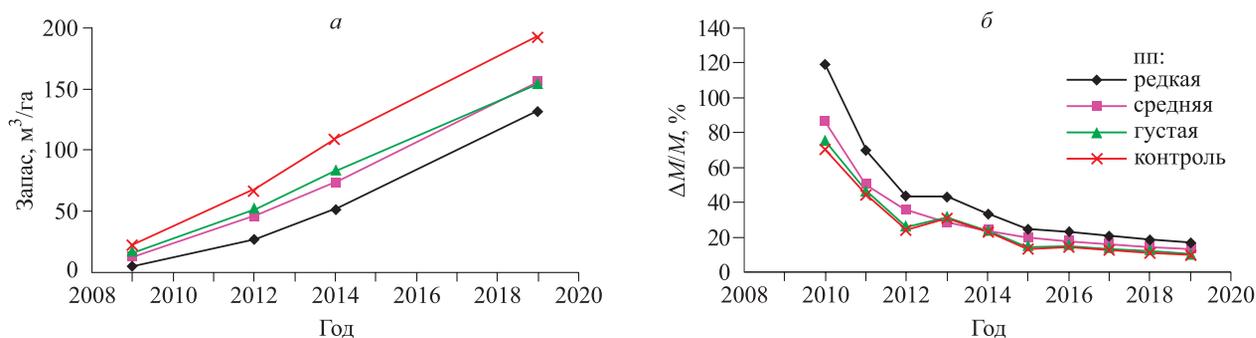


Рис. 4. Запасы (а) и удельная продуктивность (б) насаждений в 2009–2019 гг.

Данный показатель монотонно убывает с возрастом насаждения и независимо от его параметров может считаться относительно стабильным показателем продукционного процесса (Бузыкин и др., 1991). Подобный подход применяется также при расчете удельной чистой первичной продуктивности (Хабибуллина и др., 2013; Усольцев и др., 2015).

Динамика удельной продуктивности показывает, что эффект от рубки ухода, изначально выраженный тем больше, чем больше была ее интенсивность, заканчивается в 2012 г. на густой и средней по густоте пп, т. е. длится 3 года (рис. 4, б). В последующие годы, несмотря на различные абсолютные значения таксационных характеристик, тренды удельной продуктивности этих двух вариантов разреживания и контроля близки.

*Второй блок.* Как и в случае с первым блоком эксперимента, начальное состояние молодняков – загущенные ценозы. Густота, полученная в результате рубок ухода, соответствовала промежуточному варианту средней и густой пп из первого блока. Анализ распределений по диаметру показал «опережение» в росте через 4 года после начала эксперимента группы пп с проведенными рубками при отсутствии заметной разницы между дозами удобрений (рис. 5). Через 9 лет различия между пп сгладились.

Прирост по диаметру относительно контроля через 4 года увеличился в 1.5–1.8 раза для пп с рубками и удобрениями, в 1.2–1.3 раза для группы с удобрениями и в 1.4–1.6 и 1.1–1.3 раза соответственно через 9 лет (рис. 6, а). Относительное увеличение приростов за первые 4 и последующие 5 лет составляло 1.7–2.0 и 1.4–1.5 раза соответственно для всех пп независимо от типа воздействия.

Прирост в высоту относительно контроля практически не выражен – 0.9–1.1 раза для обоих периодов и всех пп, равно как и относительный прирост – 1.4–1.6 раза (рис. 6, б).

Эксперименты, связанные с влиянием удобрений на прирост молодняков сосны, свидетельствуют также о запаздывании реакции прироста на данный модифицирующий фактор. По истечении 4 лет после внесения удобрений не выявлено их влияния на средний периодический прирост, тогда как в последующие 5 лет тенденция его повышения с увеличением дозы удобрений просматривается достаточно отчетливо (рис. 7).

С учетом того что прирост является функцией целого комплекса экзогенных факторов, предпринята попытка выявить его зависимость от совместного влияния удобрений и рубок ухода в сосновых молодняках, которая выражается следующим уравнением:

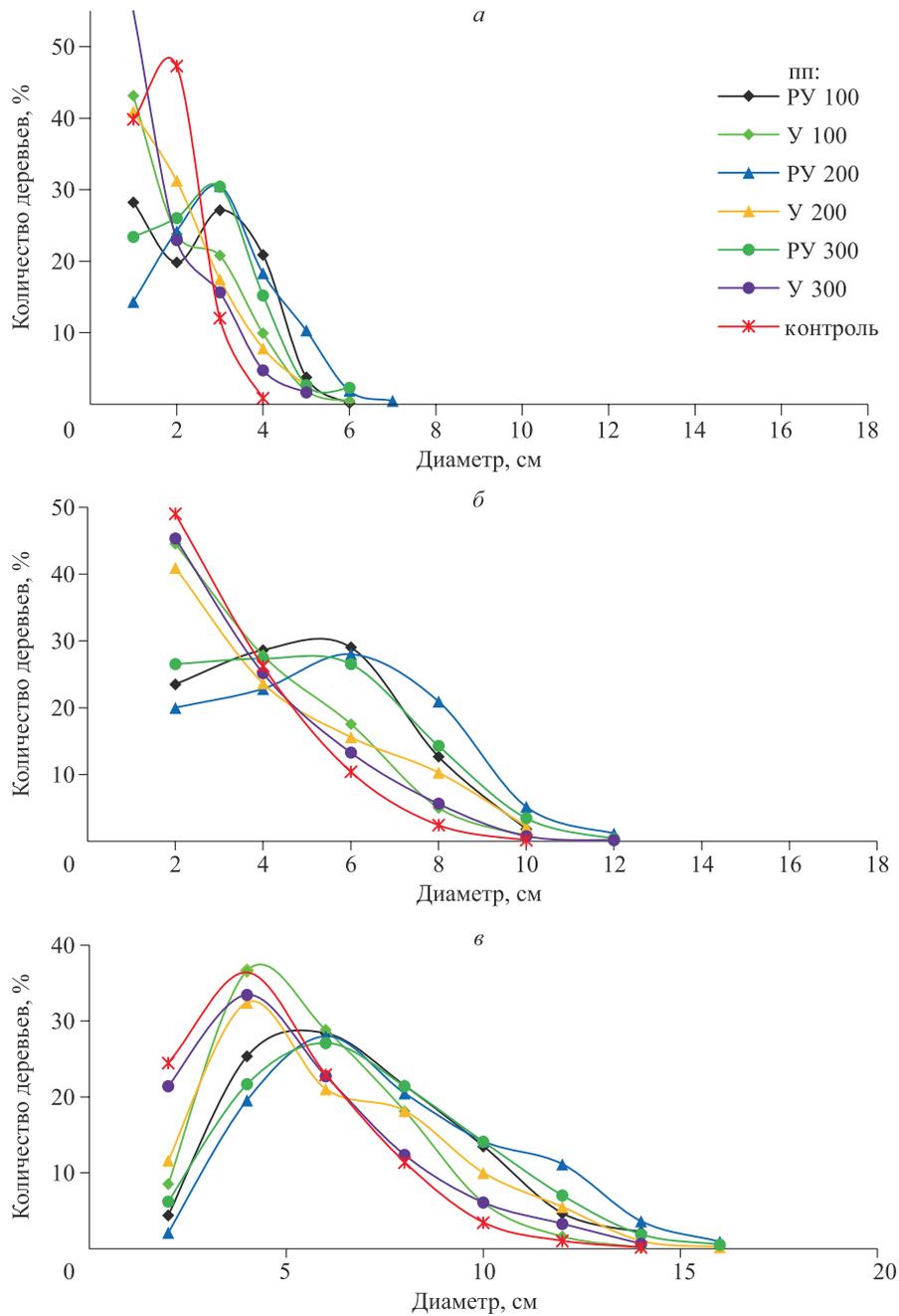
$$P = 22.5 + 0.006 \times D \times \ln(N) - 0.41 \times \ln(D), \quad (3)$$

$$R^2 = 0.51; \sigma = 1.36; F = 2.14,$$

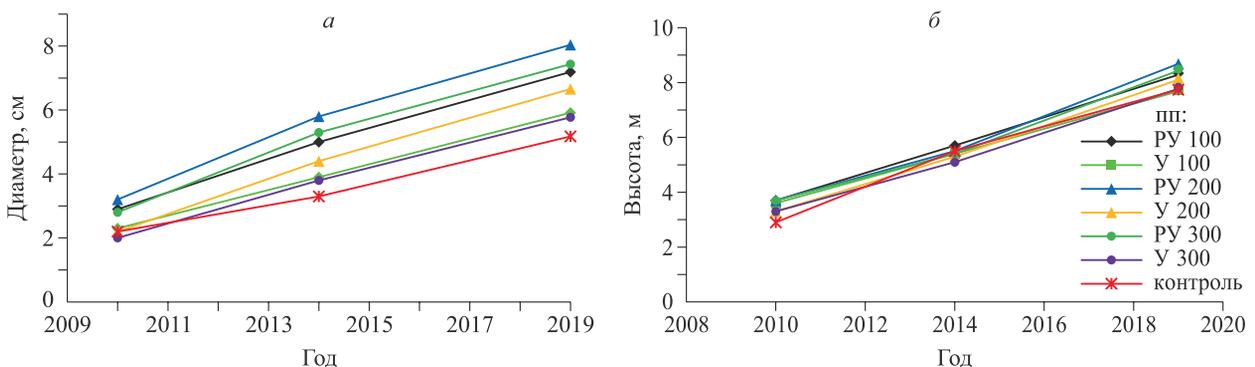
где  $P$  – текущий периодический прирост, м³/(га · год);  $D$  – доза внесения удобрений, кг/га;  $N$  – густота древостоя, тыс. шт./га;  $R^2$  – коэффициент множественной детерминации;  $\sigma$  – стандартная ошибка уравнения, м³/(га · год);  $F$  – критерий Фишера

Анализ графической формы модели (3) (рис. 8) свидетельствует о повышении прироста с увеличением дозы вносимых удобрений. Следует также отметить, что позитивное влияние густоты на прирост в возрасте насаждений старше 18 лет начинает ослабевать (см. рис. 3), однако при внесении удобрений эта тенденция продолжает сохраняться (рис. 8).

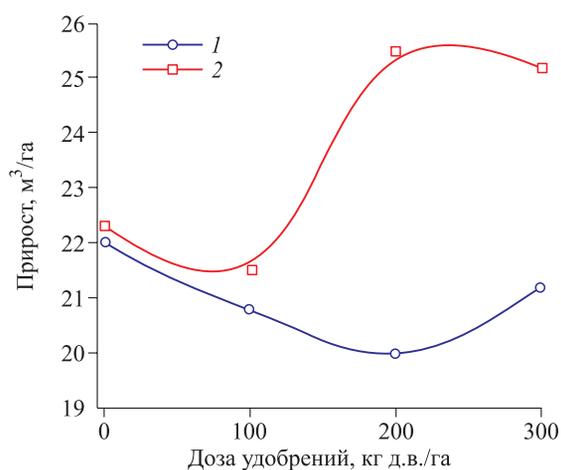
Очевидно, это связано с тем, что за счет повышения плодородия почв конкурентные отношения между растениями за ресурсы среды становятся менее критичными и позволяют на единице площади успешно продуцировать большему числу растений, обеспечивая наивысшую интегральную продуктивность древостоя.



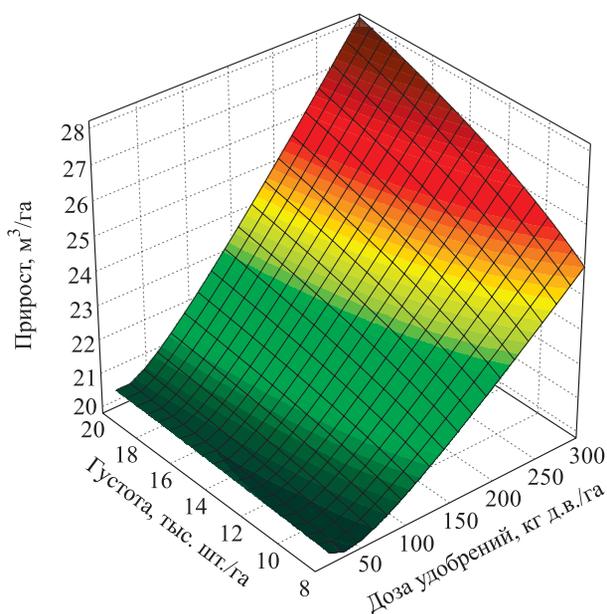
**Рис. 5.** Распределение по диаметру относительного количества деревьев в сосновых молодняках после внесения удобрений и рубок ухода (а), через 4 (б) и 9 (в) лет.



**Рис. 6.** Таксационные показатели в сосновых молодняках после внесения удобрений и рубок ухода.



**Рис. 7.** Зависимость среднего периодического прироста от дозы удобрений в первые 4 года после внесения удобрений (1) и в последующие 5 лет (2).



**Рис. 8.** Зависимость среднего периодического прироста от дозы удобрений в период их действия и густоты древостоев.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что через 5 лет после проведения рубок ухода в сосновых молодняках наибольший лесоводственный эффект достигнут в ценозе при интенсивности вырубki 93 %: средний диаметр деревьев увеличился с 3.54 до 8.03 см, что в 2.4 раза больше по сравнению с контролем, средняя высота деревьев возросла с 2.39 до 6.18 м, что в 1.1 раза больше по сравнению с контролем, прирост запаса стволовой древесины – в 10.2 раза, на контроле – в 4.9 раза. Рубки ухода в молодняках высокой интенсивности (93 %) снизили конкуренцию между де-

ревьями, способствовали увеличению площади питания и активному росту и развитию оставшихся деревьев.

Сосновые молодняки с интенсивностью разреживания 77 и 59 % по количеству деревьев (пп 2 и 3) испытывают острые стрессовые взаимоотношения между деревьями, и нуждаются в лесоводственных мероприятиях, направленных на снижение количества деревьев, ослабленных и отставших в росте для повышения продуктивности насаждений. Понижение удельной продуктивности этих насаждений до уровня контроля через 3 года после первого приема разреживания свидетельствует о том, что они полностью использовали предоставленный им пространственный ресурс и есть необходимость проведения в них дополнительного ухода.

Вместе с тем, если оценивать углерод депонирующие функции сосновых молодняков в лучших лесорастительных условиях, которым соответствуют условия Красноярской лесостепи, то следует отметить, что насаждения с наибольшей густотой до возраста 14–17 лет отличаются максимальным приростом древесины.

При этом внесение удобрений обеспечивает сохранение приоритета перегушенных молодняков в накоплении древесной массы по сравнению с разреженными. Такая ситуация обусловлена повышением плодородия почв, в результате чего конкурентные отношения между растениями за ресурсы среды становятся менее критичными. Это позволяет на единице площади успешно продуцировать большему числу растений, обеспечивая наивысшую интегральную продуктивность древостоя.

*Исследование выполнено в рамках проекта «Развитие научно-образовательного Центра мониторинга климатически активных веществ (Углерод в экосистемах: мониторинг) в рамках Федеральной научно-технической программы в области экологического развития Российской Федерации и климатических изменений на 2021–2030 годы».*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Агроклиматический справочник по Красноярскому краю и Тувинской автономной области. Л.: Гидрометеиздат, 1961. 288 с.
- Боболева Э. С. К характеристике почвенного покрова Погорельского стационара // Исследования в лесах Сибири. Ч. 1. Красноярск: Ин-т леса и древесины им. В. Н. Сукачева СО АН СССР, 1968. С. 33–38.

- Бузыкин А. И., Исмагилов А. М., Суворова Г. Г., Щербатюк А. С. Оценка продуктивности деревьев и древостоев // Лесоведение. 1991. № 6. С. 16–25.
- Бузыкин А. И., Пишеничникова Л. С. Влияние густоты на морфоструктуру и продуктивность культур сосны // Лесоведение. 1999. № 3. С. 38–43.
- Воропанов П. В. О повышении общей продуктивности лесов рубками ухода. М.; Л.: Гослесбумиздат, 1960. 156 с.
- Георгиевский Н. П. Рубки ухода за лесом. М.: Гослесбумиздат, 1957. 142 с.
- Давыдов А. В. Рубки ухода за лесом. М.: Лесн. пром-сть, 1971. 183 с.
- Иванов В. В., Борисов А. Н., Петренко А. Е., Семенякин Д. А., Собачкин Д. С., Собачкин Р. С. Густота сосновых древостоев при интенсивном лесовыращивании // Сиб. лесн. журн. 2017. № 6. С. 102–109.
- Изюмский П. П. Рубки промежуточного пользования в равнинных лесах. М.: Лесн. пром-сть, 1969. 152 с.
- Мариничев Е. А. Внесение минеральных удобрений на осушаемых торфяных почвах // Лесные ресурсы таежной зоны России: проблемы лесопользования и лесовосстановления: материалы Всерос. науч. конф. с междунар. участ. Петрозаводск, 2009. С. 201–202.
- Моисеев В. С. Таксация молодняков: Учеб. пособие. Л.: ЛЛТА, 1971. 344 с.
- Новосельцев В. Н. Теория управления и биосистемы: Анализ сохранительных свойств. М.: Наука, 1978. 320 с.
- Онучин А. А., Собачкин Д. С., Собачкин Р. С., Петренко А. Е., Иванов В. В. Реакция средневозрастных сосняков Красноярской лесостепи на внесение азотных удобрений и изреживание // Сиб. лесн. журн. 2022. № 3. С. 15–23.
- Побединский А. В. Изучение лесовосстановительных процессов. М.: Наука, 1966. 64 с.
- Полянский Е. В., Сеннов С. Н. Опыт оценки экономической эффективности систем рубок ухода за лесом // Экономика труда и производства в лесном хозяйстве. Л.: ЛенНИИЛХ, 1975. № 23. С. 69–87.
- Пишеничникова Л. С., Онучин А. А., Собачкин Р. С., Петренко А. Е. Особенности роста сосновых культур разной густоты в условиях южной тайги Сибири // Сиб. лесн. журн. 2022. № 3. С. 24–33.
- Разин Г. С., Рогозин М. В. О законах и закономерностях роста и развития, жизни и отмирания древостоев // Лесн. хоз-во. 2010. № 2. С. 19–20.
- Савина А. В. Физиологическое обоснование рубок ухода. М.; Л.: Гослесбумиздат, 1961. 98 с.
- Сеннов С. Н. Рубки ухода за лесом. М.: Лесн. пром-сть, 1977. 160 с.
- Сеннов С. Н. Уход за лесом. М.: Лесн. пром-сть, 1984. 127 с.
- Усольцев В. А., Субботин К. С., Кох Е. В., Богословская О. А. Биологическая продуктивность сосновых лесов Евразии: Исследование системных связей, обеспечивающих эффективность принятия решений в лесном секторе средствами IT-технологий. Екатеринбург: УГЛТУ, 2015. 157 с.
- Федорец Н. Г., Соколов А. И., Солодовников А. Н. Последействие минеральных удобрений в посевах сосны в долгосрочном эксперименте в Карелии // Лесоведение. 2018. № 5. С. 372–380.
- Хабидуллина Н. В., Усольцев В. А., Колтунова А. И. Удельная чистая первичная продукция древостоев и её связь с определяющими факторами // Изв. Оренбург. гос. агр. ун-та. 2013. № 5 (43). С. 210–213.

## REACTION OF YOUNG PINE STANDS IN KRASNOYARSK FOREST-STEPPE TO THINNING AND APPLICATION OF NITROGEN FERTILIZERS

A. A. Onuchin, A. E. Petrenko, D. S. Sobachkin, R. S. Sobachkin

*V. N. Sukachev Institute of Forest, Russian Academy of Science, 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, alcorsci@bk.ru, dens@ksc.krasn.ru, romans@ksc.krasn.ru

As a result of an experiment on thinning of different intensity and the application of fertilizers (carbamide, 46 % as the active ingredient) in the young stands of the Krasnoyarsk forest-steppe, formed on former agricultural land, with the initial density 30 thousand trees per ha, data were obtained on the response of cenoses to the complex treatment. Dependences of growth on the age and initial density of plantings, and on the density and dose of fertilizer were built. It is shown that on the plots with the thinning intensity of 77 and 59 % of the number of trees, after 10 years it is necessary to carry out a second thinning treatment. It has been established that the growth response to the application of fertilizers begins from the fifth year after their application. The application of fertilizers makes it possible to reduce the competition between trees for environmental resources, which allows overdense young stands to provide the maximum possible productivity up to a certain age. The results obtained can be used not only in solving forestry problems of increasing the productivity of plantations, but also to increase their carbon sequestration functions.

**Keywords:** *thinning, nitrogen fertilizer, increment, density, timber stock.*

**How to cite:** *Onuchin A. A., Petrenko A. E., Sobachkin D. S., Sobachkin R. S. Reaction of young pine stands in Krasnoyarsk forest-steppe to thinning and application of nitrogen fertilizers // Sibirskij Lesnoj Zurnal (Sib. J. For. Sci.). 2022. N. 3. P. 6–14 (in Russian with English abstract).*

УДК 630\*562.2:631.841.7

## РЕАКЦИЯ СРЕДНЕВОЗРАСТНЫХ СОСНЯКОВ КРАСНОЯРСКОЙ ЛЕСОСТЕПИ НА ВНЕСЕНИЕ АЗОТНЫХ УДОБРЕНИЙ И ИЗРЕЖИВАНИЕ

А. А. Онучин, Д. С. Собачкин, Р. С. Собачкин, А. Е. Петренко, В. В. Иванов

*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, dens@ksc.krasn.ru, romans@ksc.krasn.ru, alcorsci@bk.ru,  
viktor\_ivanov@ksc.krasn.ru

*Поступила в редакцию 09.11.2021 г.*

На основе анализа динамики прироста древесины в средневозрастных сосняках Красноярской лесостепи различной структуры, сформированных посредством рубок ухода разной интенсивности и внесения различных доз минеральных удобрений (карбамид, 46 % действующего вещества), установлены закономерности изменения текущего ежегодного прироста. Предложена модель, позволяющая оценивать тенденции изменения прироста с возрастом и густотой насаждений, продуцирующих как с применением удобрений, так и без них. Приведены фактические данные, свидетельствующие о том, что в условиях Красноярской лесостепи за счет внесения удобрений текущий ежегодный прирост в сосновых насаждениях может быть увеличен на 1.2–6.8 м<sup>3</sup>/га по сравнению с контролем. Выявлены различия в реакции насаждений на удобрение в первые 5 лет и последующие 3 года. Установлено, что текущий ежегодный прирост существенно возрастает с 6-го года после внесения удобрений. Установлены густотно-возрастные оптимумы продуктивности сосновых древостоев, обеспечивающие кратное увеличение прироста управляемыми насаждениями по сравнению с контролем. Полученные знания представляют теоретическую основу реализации модели интенсивного использования и воспроизводства лесов в лучших лесорастительных условиях и будут полезны при создании карбоновых ферм, основное назначение которых – снижение углеродного следа промышленных предприятий, а также транспортных компаний и животноводческих комплексов.

**Ключевые слова:** рубки ухода, внесение удобрений, прирост, отпад, густота, запас стволовой древесины, лесоклиматические проекты, карбоновые фермы.

DOI: 10.15372/SJFS20220302

### ВВЕДЕНИЕ

Проблема повышения продуктивности насаждений становится все более актуальной по мере осознания того, что экстенсивная модель развития лесной отрасли России приводит к негативным изменениям в структуре лесного фонда и дефициту качественного сырья, востребованного предприятиями лесного комплекса (Онучин и др., 2018). При существующей системе ведения лесного хозяйства все более отчетливо обостряется дефицит качественной древесины, пользующейся спросом на рынке. Экономически и экологически доступных высокопродуктивных лесов пионерного освоения становится все меньше, поэтому возникает не-

обходимость организации процесса выращивания востребованной древесины с использованием специальных технологий, что обуславливает переход лесного хозяйства к модели интенсивного использования и воспроизводства лесов, подразумевающей и плантационное лесовыращивание (Шутов и др., 2007).

Прирост – важнейшая таксационная характеристика древостоев, которая характеризует их продуктивность и ресурсное значение. Увеличение этого показателя в результате хозяйственных мероприятий может служить мерилем обоснованности вложения сил и средств в повышение продуктивности лесов и в сокращение сроков выращивания. Текущий прирост зависит от целого комплекса экзогенных и эндогенных факто-

ров и их сочетаний, включая почвенно-климатические и погодные условия, фитоценологическую структуру насаждений, воздействие внешних природных и антропогенных факторов, возраст и наследственность. Понимание механизмов взаимообусловленности и синэфектов воздействия этих факторов на прирост дает лесоведам возможность принимать обоснованные решения в части управления процессами роста насаждений посредством рубок ухода, лесомелиоративных мероприятий и т. д. с целью получения желательного эффекта.

Одним из способов повышения биологической продуктивности лесных насаждений является применение минеральных удобрений. Информация об отклике древесных ценозов на различные дозы минеральных удобрений важна для повышения их продуктивности, особенно в контексте реализации модели интенсивного использования и воспроизводства лесов.

С учетом того что парниковая теория глобальных климатических изменений доминирует в научных и общественных кругах, большое внимание уделяется изучению основных механизмов, регулирующих процессы накопления и эмиссии углерода экосистемами. Наряду с решением традиционных для лесного хозяйства проблем, связанных с повышением продуктивности лесов и организацией системы устойчивого управления лесами, актуальной становится задача реализации так называемых лесоклиматических проектов, которые призваны увеличить депонирование углерода лесами и способствовать смягчению процессов глобального потепления. Снижения концентрации парниковых газов в атмосфере можно достичь за счет сокращения выбросов либо увеличением их поглощения наземными экосистемами. Считается, что леса обеспечивают практически весь сток углерода в растительные экосистемы (Pan et al., 2011; Швиденко, Щепаченко, 2014; Le Quere et al., 2015), соответственно они должны рассматриваться как ключевой фактор стабилизации климата нашей планеты и устойчивого функционирования биосферы. Очевидно, что результаты, полученные при решении каждой из этих задач, могут гармонично сочетаться и взаимно дополнять друг друга.

Целью описанного в данной статье эксперимента была оценка реакции средневозрастных сосновых насаждений на внесение азотных удобрений и проведение рубок ухода различной интенсивности в условиях Красноярской лесостепи.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Объектами исследований реакции на азотные удобрения стали высокоплотные средневозрастные сосновые насаждения I класса бонитета, произрастающие в Красноярской лесостепи (экспериментальное хозяйство «Погорельский бор»). Эксперимент с внесением различных доз удобрений (карбамид, 46 % действующего вещества – д.в.) был заложен в 2010 г., во второй половине вегетационного периода: на четырех пробных площадях (0.15 га) вносилось соответственно 100, 200, 300 и 400 кг д.в./га. На пятой пробной площади (0.3 га) удобрения не применялись, она служила в качестве контроля. Удобрения равномерно разбрасывались ручным способом по поверхности без заделки в почву. Почвенные условия и напочвенный покров подробно рассмотрены О. А. Шапченковой с соавт. (2015).

Исследуемые насаждения имели близкие таксационные показатели (табл. 1).

Их густота колебалась от 2.64 до 2.9 тыс. шт./га, сумма площадей сечений стволов – от 48.87 до 54.36 м<sup>2</sup>/га, запас стволовой древесины – от 423 до 481 м<sup>3</sup>/га, средний диаметр – от 15.3 до 15.9 см, а средняя высота – от 18.3 до 18.5 м.

На каждой пробной площади проведен сплошной пересчет деревьев с замером диаметров на высоте 1.3 м по общепринятым методикам (Побединский, 1966; Моисеев, 1971). Для определения основных средних таксационных показателей древостоев подбирались модельные деревья, по 25–30 экз. исходя из принципов равномерно-ступенчатой представленности, с замером диаметра и высоты у каждой модели. Эти данные использовались для построения зависимостей высоты от диаметров. После внесения удобрений по тем же методикам в 2015 и 2018 гг. проводились повторные измерения с замерами модельных деревьев, на основе которых рассчитывались текущие ежегодные приросты стволовой древесины и отпад.

Объектами исследований влияния рубок ухода на структуру и продуктивность древостоев служили чистые по составу средневозрастные сосновые насаждения, сформированные на вырубке 1965 г., типичные для сосновых боров Красноярской лесостепи. В 2011 г. заложены две постоянные пробные площади (пп) в сосняке зеленомошном I класса бонитета.

На пп 0.15 га произрастало более 300 деревьев, что обеспечило репрезентативность ре-

**Таблица 1.** Таксационные показатели сосновых древостоев с внесенными удобрениями

Внесенные удобрения, кг д.в./га	Возраст, лет	Густота, шт./га	Средний диаметр, см	Средняя высота, м	Сумма поперечных сечений стволов, м <sup>2</sup> /га	Полнота	Запас	Текущий	
							стволовой древесины	ежегодный прирост	
							м <sup>3</sup> /га		
<i>2010 г.</i>									
Контроль	52	2640	15.4 ± 0.2	18.4 ± 0.1	48.87	1.3	423	–	
100	52	2733	15.9 ± 0.3	18.3 ± 0.2	54.36	1.5	481	–	
200	52	2907	15.3 ± 0.3	18.4 ± 0.2	53.24	1.4	461	–	
300	52	2773	15.4 ± 0.3	18.3 ± 0.2	51.83	1.4	449	–	
400	52	2827	15.5 ± 0.3	18.5 ± 0.2	53.18	1.4	462	–	
<i>2015 г.</i>									
Контроль	57	2353	17.0 ± 0.2	19.4 ± 0.1	53.54	1.4	482	15.1	
100	57	2253	18.1 ± 0.4	19.8 ± 0.1	58.12	1.5	535	15.4	
200	57	2480	16.9 ± 0.3	19.3 ± 0.1	55.57	1.5	498	10.4	
300	57	2573	16.7 ± 0.3	19.2 ± 0.1	56.17	1.5	501	12.4	
400	57	2480	17.1 ± 0.3	19.4 ± 0.1	56.86	1.5	511	12.6	
<i>2018 г.</i>									
Контроль	60	2160	18.1 ± 0.2	20.6 ± 0.1	55.73	1.4	512	14.0	
100	60	2053	19.5 ± 0.4	21.0 ± 0.1	61.12	1.5	575	16.5	
200	60	2187	18.4 ± 0.3	20.6 ± 0.1	57.94	1.5	533	17.2	
300	60	2347	17.8 ± 0.3	20.4 ± 0.1	58.18	1.5	531	15.4	
400	60	2200	18.5 ± 0.3	20.6 ± 0.1	58.97	1.5	544	15.0	

**Таблица 2.** Таксационные показатели сосновых древостоев, пройденных рубками ухода различной интенсивности

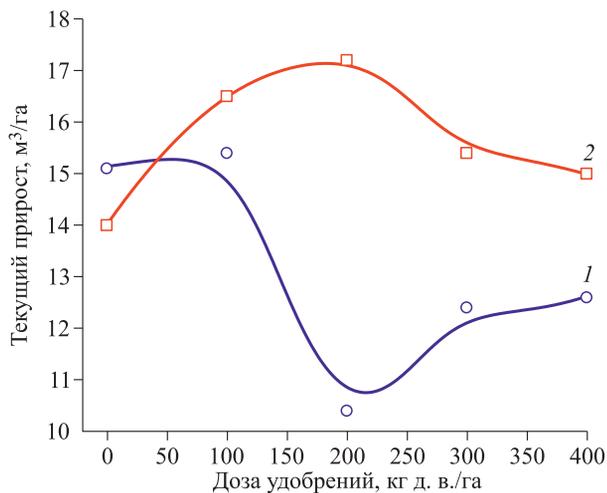
Номер пп	Возраст, лет	Густота, шт./га	Средний диаметр, см	Средняя высота, м	Сумма поперечных сечений стволов, м <sup>2</sup> /га	Полнота	Запас	Текущий
							стволовой древесины	ежегодный прирост
							м <sup>3</sup> /га	
1	37	2727	13.2	17.6	37.5	1.1	308	13.3
	47	2420	15.8	19.0	47.4	1.4	415	14.5
	51	1280	18.0	19.7	32.5	1.0	293	17.6
	55	1247	20.3	21.0	40.4	1.0	396	21.9
2	37	4020	12.4	17.1	48.2	1.5	388	10.2
	47	2073	17.1	19.6	50.5	1.5	456	13.7

зультатов. К 37-летнему возрасту насаждения обладали высокими полнотой и густотой и характеризовались значительной дифференциацией деревьев по диаметру. Рубки ухода (прочистки) проводились по низовому методу интенсивностью 43–55 % по числу стволов, густота после проведения рубок составила 2.4–2.7 тыс. шт./га. В возрасте 51 год на пп 1 проведена рубка ухода (прореживание) интенсивностью 47 % по числу стволов (табл. 2).

В качестве контроля служила та же пробная площадь, что и при внесении удобрений.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ влияния удобрений на рост средневозрастных сосновых высокополнотных древостоев показал, что за первые 5 лет после начала эксперимента не выявлено ожидаемого влияния удобрений на средний текущий прирост. Наибольший прирост отмечался на контроле и в варианте опыта с наименьшей дозой внесения удобрений, однако в последующие 3 года такая реакция стала проявляться (рис. 1). Вероятно, это обусловлено определенным лагом до-



**Рис. 1.** Средний годичный текущий прирост в первые 5 лет наблюдений – с 2011 по 2015 гг. (1) и в последующие 3 года – с 2016 по 2018 гг. (2).

ступности удобрений относительно сроков их внесения. Такое запаздывание отмечалось и в результатах ранее проведенных исследований (Победов, Волчков, 1975; Бузыкин и др., 1996), свидетельствующих о том, что в первые годы после внесения, минеральные удобрения потребляются мхами, живым напочвенным покровом, аккумулируются в подстилке и почве, поскольку труднодоступны для деревьев. Только по истечению ряда лет, по мере достижения элементами питания корнеобитаемого слоя крупных деревьев, они становятся доступными и способствуют увеличению их прироста.

Запаздывание реакции прироста на внесение удобрений отмечалось также и в заболоченных сосняках Европейского Севера России, где после осушения проводились комплексные уходы (Мариничев, 2009).

Известно, что уже в первый год после внесения минеральных удобрений содержание азота во мхах по сравнению с контролем возрастает в 2–2.5 раза. Наибольшее накопление азота в живом покрове происходит на 2-й год после подкормки, в последующем количество его снижается. Интенсивно поглощенный в первые 2 года и биологически закрепленный азот в дальнейшем постепенно возвращается в почву. Живой напочвенный покров, особенно в первые годы после подкормки, может рассматриваться как главный конкурент древостою в отношении поглощения элементов питания, что и подтвердили анализы тонких корней сосны (*Pinus L.*) на содержание макроэлементов (Бузыкин и др., 1996).

В течение первых 5 лет после начала эксперимента наибольший прирост отмечен на участ-

ке с дозой удобрения 100 кг д.в./га, где он составил 15.4 м³/га, наименьший – 10.4 м³/га при дозе удобрения 200 кг д.в./га (табл. 1, рис. 1). На участках с внесением удобрений в количестве 300 и 400 кг д.в./га прирост составил соответственно 12.4 и 12.6 м³/га. Таким образом, очевидно, что в первые годы эффект влияния удобрений на прирост не отмечен, а наблюдаемые различия в приросте, вероятно, обусловлены фитоценотическими особенностями насаждений.

С 6-го года эксперимента наибольший текущий ежегодный прирост стволовой древесины отмечается на участке с дозой удобрения 200 кг д.в./га, где он составил 17.2 м³/га, наименьший – 14.0 м³/га на контрольном участке. В то же время на участках с внесением удобрений в количестве 100, 300 и 400 кг д.в./га прирост составил соответственно 16.5, 15.4 и 15.0 м³/га (табл. 1, рис. 1). Полученные результаты не позволяют утверждать о наличии очевидной количественной связи прироста с дозой внесенных удобрений, тем не менее с начала действия удобрений во всех вариантах с внесением удобрений наблюдается увеличение текущего прироста по сравнению с предыдущим периодом, за исключением контроля, где он уменьшился. Проявляющаяся в этом возрасте сильная конкуренция за ресурсы и недостаток самих ресурсов привели к снижению текущего прироста на контроле, что характерно также для высокопродуктивных плотных сосняков, произрастающих в различных регионах (Швиденко и др., 2008). На участках с внесением удобрения, напротив, во всех вариантах отмечается увеличение текущего прироста (табл. 1, рис. 1), что свидетельствует об улучшении условий минерального питания деревьев. При этом максимальные значения как собственно текущего прироста, так и его увеличения по сравнению с предыдущим периодом отмечаются в варианте с дозой удобрения 200 кг д.в./га. Вероятно, реакция прироста на удобрение начинает проявляться уже при дозах менее 100 кг д.в./га, а с увеличением дозы свыше 200 кг д.в./га соответствующего повышения прироста в наших экспериментах не наблюдается (рис. 1).

На основе полученных данных можно сделать вывод лишь о том, что внесение удобрений в различных дозах способствует увеличению прироста. При оценке влияния доз вносимых удобрений на изменение прироста зависимость доза–эффект должна, по-видимому, иметь сигмоидную форму, как и в большинстве случаев, связанных с оценкой эффекта влияния некоторого лиганда на биологический объект. Однако

по экспериментальным данным в силу специфики выборки говорить об этом не представляется возможным.

Многие исследователи при изучении реакции прироста сосняков на внесение удобрений применяли дозы 120–200 кг д.в./га (Степаненко, 1993; Федорец и др., 2018; Valinger et al., 2019). При этом при многократном внесении удобрений некоторые из них отмечали значимые эффекты после первых приемов и снижение прироста после серии внесений (Jacobson, Pettersson, 2010).

Полученные результаты позволяют констатировать, что в Красноярской лесостепи за счет применения азотных удобрений можно увеличить прирост средневозрастных сосняков на 1.2–6.8 м<sup>3</sup>/(га · год) по сравнению с контролем. Актуальной задачей оценки эффективности применения удобрений для повышения биологической продуктивности сосняков является определение продолжительности действия удобрений. Необходимо отметить, что в условиях средней и южной подзон тайги в сосняках Европейского Севера России, где лесорастительные условия уступают таковым по сравнению с лесостепью, дополнительный прирост за счет применения удобрений колеблется в пределах 2.8–4.7 м<sup>3</sup>/га и в 1.5–2 раза превышает естественный средний прирост древесины в исследуемых типах леса для условий средней и южной подзон тайги (Мариничев, 2009).

Результаты долгосрочного эксперимента в среднетаежной подзоне Карелии по применению минеральных удобрений в культурах сосны выявили положительное их влияния на запас стволовой древесины. Ежегодное применение удобрений с 6-летнего возраста в дозе 120 кг д.в./га в течение 30 лет обеспечило к 53-летнему возрасту культур повышение запаса на 35–229 м<sup>3</sup>/га в зависимости от вида комбинации удобрений. При этом наибольшей эффективностью отличались азотные удобрения, а максимальный эффект обеспечивало сочетание азотных удобрений с фосфорными (Федорец и др., 2018).

В зарубежной практике в условиях бореальных лесов Финноскандии в насаждениях сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) достаточно широко используется комплексный подход, заключающийся в сочетании рубок ухода и внесения удобрений (N, а также P, K, Ca, Mg). Дозировка удобрений, как правило, составляет 150 кг д.в./га (Valinger et al., 2019), но внесение может осуществляться в несколько приемов с разной периодичностью (2–10 лет) и в итоге суммарная внесенная доза может составлять до 1650 кг д.в./га (Jacobson, Pettersson, 2010). При

этом разнообразии вариантов эффектов от этого достаточно велико – от значимого увеличения прироста в первые годы после внесения до небольшого его снижения после серии внесений удобрения по сравнению с контролем (Pettersson, Högbom, 2004). Также возможно увеличение сбежистости стволов после комплексного ухода (Karlsson, 2006). Исследователи отмечают, что по сравнению с однократным внесением удобрений, рубки ухода имеют более длительный эффект.

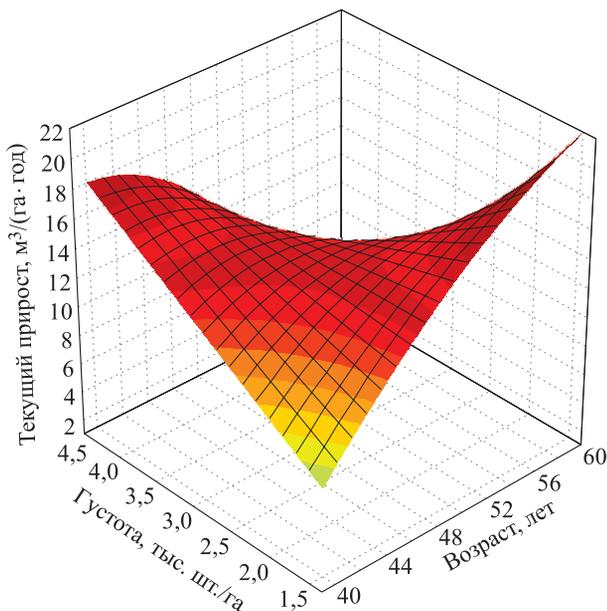
Известно, что наряду с дозой вносимых удобрений на прирост оказывают влияние и фитоценоотические факторы. Поскольку в опыте с внесением удобрений все древостои были близки по таксационным показателям, выявить влияние структуры древостоев на изменение прироста в комплексе с дозой вносимых удобрений оказалось проблематичным. В этой связи в анализ были вовлечены результаты экспериментов с проведением рубок ухода различной интенсивности в средневозрастных сосняках Красноярской лесостепи, продуцирующих без применения удобрений (табл. 2). Как свидетельствуют полученные данные, рубки ухода в целом способствуют увеличению текущего прироста древостоев, который зависит как от возраста насаждений, так и от интенсивности изреживания. В насаждениях, не пройденных рубками, в зависимости от возраста и густоты текущий прирост варьирует от 10.2 до 15.1 м<sup>3</sup>/(га · год), тогда как в насаждениях, пройденных рубками ухода различной интенсивности, в том числе не однократными, достигает 13.7–21.9 м<sup>3</sup>/(га · год), (табл. 1, 2).

После обработки методом множественного регрессионного анализа всей совокупности данных, в которую были включены результаты экспериментов с внесением различных доз удобрений, а также полученные при проведении рубок ухода различной интенсивности, выявлена зависимость текущего прироста от густоты, возраста насаждений и дозы вносимых удобрений, которая выражается следующим уравнением:

$$Pr = -66.7 + 1.7 \times A + 0.57 \times A \times N - 0.012 \times A^2 \times N + 0.12 \times \ln(D + 2) \times N, \quad (1)$$

$$R^2 = 0.85; \quad \sigma = 1.39; \quad F = 17.34,$$

где  $Pr$  – текущий прирост, м<sup>3</sup>/(га · год);  $N$  – текущая густота, тыс. шт./га;  $A$  – возраст насаждений, лет;  $D$  – доза внесенных удобрений, кг/га;  $R^2$  – коэффициент множественной детерминации;  $\sigma$  – стандартная ошибка уравнения, шт./га;  $F$  – критерий Фишера.



**Рис. 2.** Текущий прирост средневозрастных сосняков, густота которых регулировалась рубками ухода различной интенсивности без внесения удобрений.

Следует отметить, что попытка использования в качестве независимой переменной интенсивности изреживания не увенчалась успехом. Вероятно, это обусловлено определенными различиями исходной густоты в различных вариантах опыта. В то же время, как следует из результатов моделирования, актуальная густота насаждений хорошо отражает показатели текущего прироста.

Анализ графической формы модели (1) позволяет констатировать следующее. В высокополнотных древостоях, густота которых превышает 4 тыс. шт./га, происходит снижение текущего прироста древесины с возрастом, в то же время в насаждениях, густота которых не превышает 3 тыс. шт./га, он возрастает (рис. 2).

Полученная модель может служить инструментом определения густотно-возрастных оптимумов продуктивности, которые должны учитываться в первую очередь при ведении лесного хозяйства на основе модели интенсивного использования и воспроизводства лесов в лучших лесорастительных условиях (Онучин, Данилова, 2021). Период кульминации текущего прироста в насаждениях различной начальной густоты наступает в разные сроки. В высокополнотных насаждениях максимум прироста наступает раньше, чем в насаждениях редкостойных, однако раньше там наблюдается и резкое его снижение, поэтому регулирование густоты с целью повышения продуктивности древостоев следует на-

чинать до кульминации текущего прироста, что обеспечит его поддержание и депонирование углерода на максимально высоком уровне. Как показывает анализ динамики прироста средневозрастных сосняков, максимальные его значения наблюдаются в насаждениях, густота которых находится в диапазоне от 1.5 до 2 тыс. шт./га. С ее увеличением прирост резко снижается, что обусловлено обострением конкурентных отношений за ресурсы среды (рис. 2). В то же время в спелых сосняках Красноярской лесостепи, пройденных выборочными рубками различной интенсивности, максимальный текущий прирост (от 6 до 9 м³/га) наблюдается в древостоях, финальная густота которых находится в пределах 450–600 шт./га (Иванов, Семенякин, 2021). Увеличение или снижение густоты насаждений, выходящее за отмеченные пределы оптимума, в спелом возрасте ведет к потере прироста древесины. В 40-летних древостоях с позиций получения максимального прироста будет вероятно оптимальная густота около 4 тыс. шт./га, а в 60-летних – не более 1.5 тыс. шт./га (рис. 2).

Одна из основных задач лесоводства – повышение продуктивности лесов. Следовательно, задача увеличения текущего прироста посредством лесохозяйственных мероприятий – весьма актуальна и будет определяться всем комплексом факторов и условий произрастания лесов, включая возраст, породный состав, структуру фитоценозов, специфику лесорастительных условий и т. д. Эти факторы определяют доступный ресурс среды (Борисов, 2013), который может реализоваться в соответствующем приросте древесины при соответствующем жизненном состоянии деревьев – носителей этого прироста (Нагимов, 2000).

Результаты модельных экспериментов свидетельствуют о том, что за счет применения удобрений в высокополнотных древостоях их прирост увеличивается на 1.8 м³/га (с 13.0 до 14.8 м³/га), а в низкополнотных – всего на 0.5 м³/га (с 16.5 до 17.0 м³/га). В то же время, его фактическое увеличение за счет применения различных доз удобрений, как отмечалось выше, возрастает от 1.2 до 6.8 м³/га. На основе полученной модели можно сделать вывод, что применение удобрений несколько ослабляет эффект подавления прироста за счет обострения конкурентных отношений в высокополнотных средневозрастных сосняках (рис. 3).

Так, в насаждениях, растущих без применения удобрений, с увеличением их густоты с 1.5 до 4.5 тыс. шт./га прирост снижается с 16.5 до

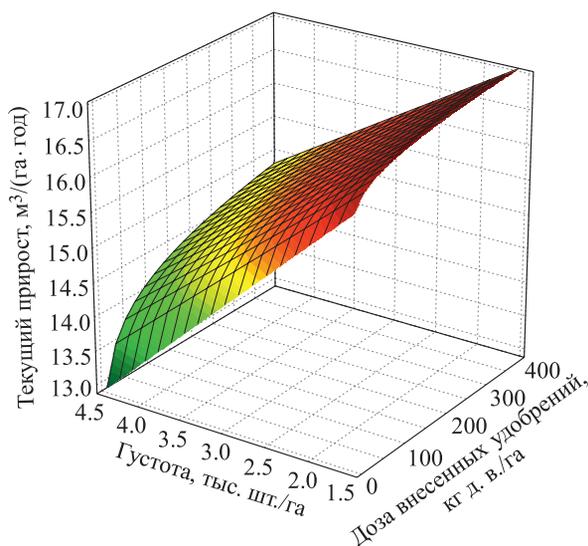


Рис. 3. Влияние удобрений на текущий прирост 55-летних сосняков различной густоты.

13 м³/га (на 3.5 м³/га), тогда как с применением удобрений – с 17 до 14.8 м³/га (всего на 2.2 м³/га).

Очевидно, что регулярным и своевременным разреживанием древостоя, начиная от молодняка до спелости, можно существенно увеличить средний прирост насаждений и повысить продуктивность древостоев на I–II класса бонитета (Рогозин, Разин, 2015).

С полной уверенностью можно утверждать, что лесоводственный эффект от рубок ухода значительно выше, чем от применения удобрений. При этом необходимо понимать, что комбинированные ухода могут быть эффективнее отдельно взятых лесохозяйственных мероприятий. В этой связи следует продолжать начатые эксперименты, расширив их посредством увеличения как числа повторностей, так и за счет включения дополнительных комбинаций факторов, влияющих на продуктивность насаждений.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В средневозрастных сосновых древостоях Красноярской лесостепи положительное влияние азотных удобрений на прирост стволовой древесины начинает проявляться по истечению 5 лет после внесения. Запаздывание отклика древостоя на применение удобрений относительно сроков их внесения обусловлено первоначальным потреблением элементов питания живым напочвенным покровом и аккумуляцией в подстилке. Результаты эксперимента свидетельствуют о том, что за счет применения азот-

ных удобрений текущий ежегодный прирост можно повысить на 1.2–6.8 м³/га по сравнению с контролем, однако полученные результаты не позволяют утверждать о наличии четкой зависимости: доза–эффект.

Рубки ухода в целом способствуют увеличению текущего прироста древостоев, а их эффективность будет определяться финальной густотой насаждений в том или ином возрасте. Получена модель изменения текущего прироста средневозрастных сосняков в зависимости от возраста, густоты древостоев и дозы вносимых удобрений, которая может служить инструментом определения густотно-возрастных оптимумов продуктивности насаждений при ведении лесного хозяйства на основе модели интенсивного использования и воспроизводства лесов в лучших лесорастительных условиях. Задача определения таких оптимумов продуктивности актуальной остается для всего периода жизни насаждений и попытки этого предпринимаются (Иванов, Семенякин, 2021; Онучин и др., 2022).

Очевидно, что лесоводственный эффект от рубок ухода значительно выше, чем от применения удобрений. При этом необходимо понимать, что комбинированные ухода могут быть эффективнее отдельно взятых лесохозяйственных мероприятий. В этой связи следует расширить эксперименты посредством увеличения числа повторностей и за счет включения дополнительных комбинаций факторов, влияющих на продуктивность насаждений.

Полученные результаты могут служить основой реализации проектов лесопользования в целях решения традиционных задач лесного хозяйства, связанных с повышением продуктивности лесов, и увеличения секвестра углерода на землях лесного фонда и на бывших сельскохозяйственных угодьях. В реализации такого рода проектов должны быть заинтересованы и промышленные предприятия, продукция которых поступает на международный рынок, где к ней предъявляются требования по соблюдению принципа углеродной нейтральности.

*Исследование выполнено в рамках проекта «Развитие научно-образовательного Центра мониторинга климатически активных веществ (Углерод в экосистемах: мониторинг) в рамках Федеральной научно-технической программы в области экологического развития Российской Федерации и климатических изменений на 2021–2030 годы».*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Борисов А. Н. Метод оценки распределения ресурса между деревьями в древостое // Состояние лесов и актуальные проблемы лесопользования: материалы Всерос. конф. с междунар. участ. Хабаровск: ДальНИИЛХ, 2013. С. 293–296.
- Бузыкин А. И., Прокушкин С. Г., Пшеничникова Л. С. Реакция сосняков на изменение условий азотного питания // Лесоведение. 1996. № 3. С. 3–15.
- Иванов В. В., Семенякин Д. А. Влияние выборочных рубок на продуктивность сосновых древостоев в условиях Красноярской лесостепи // Сиб. лесн. журн. 2021. № 1. С. 58–67.
- Мариничев Е. А. Внесение минеральных удобрений на осушаемых торфяных почвах // Лесные ресурсы таежной зоны России: проблемы лесопользования и лесовосстановления: материалы Всерос. науч. конф. с междунар. участ. Петрозаводск, 2009. С. 201–202.
- Моисеев В. С. Таксация молодняков. Л.: ЛЛТА, 1971. 344 с.
- Нагимов З. Я. Закономерности роста и формирования надземной фитомассы сосновых древостоев: автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук: 06.03.03. Екатеринбург: УГЛТА, 2000. 40 с.
- Онучин А. А., Данилова И. В. Технологии формирования карбоновых полигонов с высокими углерод депонирующими функциями // Наука и технологии. 2021. № 1. С. 50–52.
- 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., Соколов В. А., Рыбаков Г. К. К вопросу эффективного использования и воспроизводства лесов России // Pulp & Paper Industry. 2018. № 1/5. С. 6–10.
- Побединский А. В. Изучение лесовосстановительных процессов. М.: Наука, 1966. 60 с.
- Победов В. С., Волчков Е. В. Влияние азотных удобрений на величину текущего прироста сосновых насаждений // Лесовед. и лесн. хоз-во. Вып. 9. Минск: Вышэйш. шк., 1975. С. 140–149.
- Рогозин М. В., Разин Г. С. Развитие древостоев. Модели, законы, гипотезы. Пермь: Перм. гос. науч.-иссл. ун-т, 2015. 277 с.
- Степаненко И. И. Влияние минеральных удобрений на строение и формирование древесины сосны в связи с типами леса: автореф. дис. ... канд. биол. наук: 03.00.16. М.: МГУЛ, 1993. 24 с.
- Федорец Н. Г., Соколов А. И., Солодовников А. Н. Последствие минеральных удобрений в посевах сосны в долгосрочном эксперименте в Карелии // Лесоведение. 2018. № 5. С. 372–380.
- Шапченкова О. А., Ковалева Н. М., Иванов В. В., Собачкин Р. С., Собачкин Д. С., Петренко А. Е. Влияние азотных удобрений на свойства подстилки и живой напочвенный покров в сосновых насаждениях Красноярской лесостепи // Лесоведение. 2015. № 1. С. 44–51.
- Швиденко А. З., Щепаченко Д. Г. Углеродный бюджет лесов России // Сиб. лесн. журн. 2014. № 1. С. 69–92.
- Швиденко А. З., Щепаченко Д. Г., Нильсон С., Булуй Ю. И. Таблицы и модели хода роста и продуктивности насаждений основных лесобразующих пород Северной Евразии (нормативно-справочные материалы). Изд. 2-е, доп. М.: Междунар. ин-т приклад. систем. анализа, 2008. 886 с.
- Шутов И. В., Маркова И. А., Омеляненко А. Я., Постников М. В., Товкач Л. Н., Власов Р. В., Подшиваев Е. Е., Сергиенко В. Г. Плантационное лесоводство. СПб.: Изд-во Политех. ун-та, 2007. 366 с.
- Jacobson S., Pettersson F. An assessment of different fertilization regimes in three boreal coniferous stands // Silva Fenn. 2010. V. 44. Iss. 5. P. 815–827.
- Le Quere C., Moriarty R., Andrew R. M., Peters G. P., Ciais P., Friedlingstein P., Jones S. D., Sitch S., Tans P., Arneeth A., Boden T. A., Bopp L., Bozec Y., Canadell J. G., Chevallier F., Cosca C. E., Harris I., Hoppema M., Houghton R. A., House J. I., Jain A. K., Johannessen T., Kato E., Keeling R. F., Kitidis V., Goldewijk K. K., Koven C., Landa C. S., Landschützer P., Lenton A., Lima I. D., Marland G., Mathis J. T., Metz N., Nojiri Y., Olsen A., Ono T., Peters W., Pfeil B., Poulter B., Raupach M. R., Regnier P., Rödenbeck C., Saito S., Salisbury J. E., Schuster U., Schwinger J., Séférian R., Segsneider J., Steinhoff T., Stocker B. D., Sutton A. J., Takahashi Y.-P., Wanninkhof R., Wiltshire A., Zeng N. Global carbon budget 2014 // Earth Syst. Sci. Data. 2015. V. 7. N. 1. P. 47–85.
- Pan Y., Birdsey R. A., Fang J., Houghton R., Kauppi P. E., Kurz W. A., Phillips O. L., Shvidenko A., Lewis S. L., Canadell J. G., Ciais P., Jackson R. B., Pacala S. W., McGuire A. D., Piao S., Rautiainen A., Sitch S., Hayes D. A large and persistent carbon sink in the world's forests // Science. 2011. V. 333. N. 6045. P. 988–993.
- Pettersson F., Högbom L. Long-term growth effects following forest nitrogen fertilization in *Pinus sylvestris* and *Picea abies* stands in Sweden // Scand. J. For. Res. 2004. V. 19. Iss. 4. P. 339–347.
- Karlsson C. Fertilization and release cutting increase seed production and stem diameter growth in *Pinus sylvestris* seed trees // Scand. J. For. Res. 2006. V. 21. Iss. 4. P. 317–326.
- Valinger E., Sjögren H., Nord G., Cedergren J. Effects on stem growth of Scots pine 33 years after thinning and/or fertilization in northern Sweden // Scand. J. For. Res. 2019. V. 34. Iss. 1. P. 33–38.

## REACTION OF MIDDLE-AGED PINE STANDS IN KRASNOYARSK FOREST-STEPPE TO NITROGEN FERTILIZERS AND THINNING

A. A. Onuchin, D. S. Sobachkin, R. S. Sobachkin, A. E. Petrenko, V. V. Ivanov

*V. N. Sukachev Institute of Forest, Russian Academy of Science, 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, dens@ksc.krasn.ru, romans@ksc.krasn.ru, alcorsci@bk.ru,  
viktor\_ivanov@ksc.krasn.ru

Based on the analysis of the wood increment dynamics in the middle-aged pine forests of the Krasnoyarsk forest-steppe of various structure, formed through thinning of different intensities and the introduction of various doses of mineral fertilizers (carbamide, 46 % of the active substance), the regularities of changes in the current annual increment were established. A model allowing assessing the trends in increment with age and density of stands growing both without and with the use of fertilizers has been proposed. Data are presented indicating that in the conditions of the Krasnoyarsk forest-steppe, due to the application of fertilizers, the current annual increment in pine plantations can be increased by 1.2–6.8 m<sup>3</sup>/ha compared to the reference site. Differences in the response of stands to fertilization in the first five years and the next three years were revealed it has been found that the current annual increment increases significantly starting from the sixth year after fertilization. The density-age optima of the productivity of pine stands, providing a multiple increase in the increment of managed stands as compared to the reference site were established. The obtained knowledge is the theoretical basis for the implementation of a model of intensive use and reproduction of forests in the best forest growing conditions, and will also be useful in creating carbon farms, which main purpose is to reduce the carbon footprint of industrial enterprises.

**Keywords:** *thinning, fertilization, increment, mortality, density, stock of stem timber, forest-climate projects, carbon farms.*

**How to cite:** *Onuchin A. A., Sobachkin D. S., Sobachkin R. S., Petrenko A. E., Ivanov V. V. Reaction of middle-aged pine stands in Krasnoyarsk forest-steppe to nitrogen fertilizers and thinning // Sibirskij Lesnoj Zurnal (Sib. J. For. Sci.). 2022. N. 3. P. 15–23 (in Russian with English abstract).*

УДК 630\*533:630\*56

## ОСОБЕННОСТИ РОСТА СОСНОВЫХ КУЛЬТУР РАЗНОЙ ГУСТОТЫ В УСЛОВИЯХ ЮЖНОЙ ТАЙГИ СИБИРИ

Л. С. Пшеничникова, А. А. Онучин, Р. С. Собачкин, А. Е. Петренко

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

Email: larisa-24pshenichnikova@yandex.ru, onuchin@ksc.krasn.ru, romans@ksc.krasn.ru, alcorsci@bk.ru

Поступила в редакцию 03.11.2021 г.

Проанализирована динамика таксационных показателей, отпада и прироста древесины 35-летних разногустотных культур сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), созданных в 1982 г. сотрудниками Института леса им. В. Н. Сукачева СО РАН под руководством А. И. Бузыкина на бывших сельскохозяйственных землях в Большемурутинском районе Красноярского края. Начальная густота культур варьировала в широком диапазоне (от 0.5 до 128.0 тыс. шт./га). Дана оценка влияния густоты деревьев на рост и продуктивность молодых насаждений сосны в возрасте 2, 5, 12, 15, 20, 25, 30 и 35 лет. Установлено, что уже с 5-летнего возраста наблюдается процесс интенсивного самоизреживания деревьев, при начальной густоте посадки 90.0 тыс. шт./га к возрасту 35 лет она уменьшилась до 10 тыс. шт./га. При густоте посадки менее 10 тыс. шт./га интенсивность самоизреживания существенно ниже и густота культур за аналогичный период уменьшилась менее чем в 2 раза. Показано, что на начальном этапе роста древостоев наблюдается увеличение прироста с начальной густотой посадки, с выходом на плато при густоте свыше 70.0 тыс. шт./га. С возрастом выход прироста на плато отмечается при меньшей густоте начальной посадки. Через 20 лет максимальный прирост наблюдался в вариантах посадки с начальной густотой от 50.0 до 70.0 тыс. шт./га, к 30 годам он сместился к диапазону густоты от 30.0 до 50.0 тыс. шт./га. Установлена зависимость между текущим ежегодным приростом, возрастом сосновых культур, начальной густотой посадки и текущей густотой насаждений. В целом прослеживается тенденция увеличения прироста с возрастом, однако для культур с начальной густотой посадки свыше 90 тыс. шт./га в возрастном интервале от 15 до 22 лет отмечается снижение текущего прироста, что, очевидно, связано с усилением конкурентных отношений в ценозе. Затем в результате снижения конкуренции вследствие самоизреживания перегущенных культур их прирост стал повышаться, однако темпы его роста отставали от таковых у культур с меньшей густотой начальной посадки. Таким образом, можно предположить, что высокие темпы депонирования углерода на начальном этапе создания культур повышенной густоты могут сохраняться при условии периодических уходов регулирующих густоту насаждений.

**Ключевые слова:** депонирование углерода, компенсационные посадки, культуры сосны, густота, возрастная динамика, прирост, моделирование.

DOI: 10.15372/SJFS20220303

### ВВЕДЕНИЕ

Основные накопители углерода на Земле – леса. На их долю приходится 75 % углерода, аккумулированного в наземной растительности (Углерод..., 1994). Особое планетарное значение в аккумуляции углерода имеют тропические и бореальные леса. Хотя бореальные леса и уступают тропическим по площади и запасам фитомассы, считается, что по своему воздействию на биосферу и параметрам углеродного

цикла они существенно превосходят тропические экосистемы, поскольку в условиях холодного климата аккумулируют углерод не только в фитомассе, но и в почвенном органическом веществе. В силу ослабленной по сравнению с тропическими лесами микробной декомпозиции органики, малонарушенные бореальные леса способны на длительное время консервировать в почве атмосферный углерод.

На долю лесов России приходится 73 % площади бореальной зоны мира. Причем 42 %

сосредоточено в Сибири. По оценке Центра по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН, из 500 млрд т С наземной биомассы вклад российских лесов составляет 34 млрд т С, из которых более 25 млрд т С приходится на хвойные леса. Суммарная аккумуляция углерода в лесных экосистемах Центральной Сибири (территория Красноярского края) составляет 15 879 млн т (156 т С/га лесопокрытой территории) (Углерод..., 1994; Государственный доклад..., 1996).

Запасы углерода в растениях важны, поскольку они могут резко колебаться при климатических изменениях или из-за изменения практик управления лесами и сельскохозяйственными землями. Хозяйственная деятельность человека и природные стихийные бедствия (пожары, ветровалы, насекомые-вредители) способны существенно изменить облик лесов, а следовательно изменяя статус лесных экосистем как источника или поглотителя (сток) углерода атмосферы. Повышение концентрации углекислого газа в атмосфере за последнее столетие, не сопровождаемое увеличением запасов фитомассы растительного покрова, свидетельствует о потере компенсаторных способностей биосферы.

Сохранение и разведение лесов стало рассматриваться как способ связывания (депонирования) атмосферного углерода, позволяющий хотя бы отчасти сбалансировать мощные выбросы углекислого газа в атмосферу при сжигании природного топлива. Суммарные объемы депонирования углерода лесами России оцениваются в 261.64 млн т/год, что эквивалентно 959 млн т углекислого газа (Исаев и др., 1995).

«Консервация» углерода, в лесных биогеоценозах возможна за счет лесовосстановления путем повышения продуктивности насаждений, либо за счет увеличения площади лесных экосистем, путем облесения не покрытых лесом площадей. В России 11 млн км<sup>2</sup> лесов и большое количество заброшенных и зарастающих сельскохозяйственных площадей, и есть все шансы стать всепланетным лидером по поглощению углекислого газа (Государственный доклад..., 1996). Компенсационные схемы с использованием лесовосстановления уже применяются в развивающихся странах, в США и Великобритании.

Современная густота и полнота наших лесов (в среднем она равна 0.65) свидетельствуют о существенном недоиспользовании древостоями ресурсов среды для формирования древесной продукции. Исследования и расчеты показывают, что только за счет повышения густоты древо-

стоев при тех же климатических и эдафических ресурсах с единицы площади можно получить в 1.5–2 раза больше древесной продукции по сравнению с наличным ее запасом в современных древостоях (Бузыкин, 1977). Следовательно, подтверждается вывод о крупном резерве повышения продуктивности за счет низко- и среднеполнотных древостоев и материализуется идея о том, что увеличение плотности зеленого покрова позволит на энергетическом входе в биосферу резко повысить его биологическую продуктивность (Тимофеев-Ресовский и др., 1969).

Среди биоценотических показателей важнейшим в продуктивности лесов является густота древостоев: в недостаточно густых древостоях с неполным использованием ресурсов среды формирование насаждений сопровождается уменьшением их продуктивности; в перегущенных (чрезмерно густых) со временем происходит замедление роста всех деревьев, что неизбежно приводит к общей депрессии насаждения и сопровождается потерей прироста и снижением продуктивности. Иными словами, густота древостоя природными регуляторами приводится в соответствие с потенциальными возможностями ресурсов среды конкретного экотопа. Есть основание полагать, что регулированием густоты можно достичь предельно возможной общей продуктивности древесины необходимого размера и качества.

Одним из альтернативных вариантов восполнения полезности современных лесов с позиций баланса углерода можно рассматривать искусственное лесовосстановление, в частности компенсационные посадки лесных культур разной густоты. С этих позиций диапазон густоты позволяет выявить наибольшую продуктивную эффективность густоты посадок с высоким запасом ствольной древесины и интенсивностью роста и соответственно с более полным поглощением углерода, которые можно рекомендовать в лесохозяйственной практике.

На современном этапе развития лесокультурного производства влияние густоты посадок на рост и формирование искусственных насаждений рассматриваются для выяснения оптимальных режимов целевого лесовыращивания, которые на лесосырьевых площадях обеспечивали бы наивысший запас к возрасту спелости. Исследования по густоте древостоев можно свести к общему положению: механизм регуляции приводит густоту и продуктивность древесных сообществ в соответствие с объемом и запасом жизненно необходимых ресурсов среды через

изменение численности и размеров особей. Нарушение природного баланса между численностью растений и ресурсами среды ведет к депрессии и прекращению роста, возникает опасность вступления перегущенных посадок в стадию необратимой регрессии. Каждому возрасту насаждений соответствует своя оптимальная для данных условий текущая густота. Она не может быть единой для каждой породы и должна дифференцироваться по природно-климатическим зонам и в пределах последних – по эдафическим условиям. Большое разнообразие почвенно-климатических, экономических и других условий исключает возможность стандартных рекомендаций густоты (Рубцов, 1964; Кретов, 1975; Родин, 1977; Тимофеев, 1977; Савич, 1978; Бузыкин и др., 2002; Усольцев, Маленко, 2014; и др.).

В boreальных лесах России углерод депонирующие возможности лесных культур изучены слабо. Фактическая густота древесных ценозов и ее густотные градиенты в публикациях по лесной экологии и лесоведению почти не рассматриваются, хотя они определяют объем и размер ресурсов среды, включая пространство роста, используемые каждой особью в процессе своего роста и развития (Региональные проблемы..., 2007; Кузьмичев, Пшеничникова, 2014).

Известно, что лесные культуры, особенно молодые, связывают атмосферный углерод более интенсивно в сравнении с естественными насаждениями, поскольку растут быстрее. Например, в тропиках около 80 % атмосферного углерода, депонируемого лесными культурами, приходится на первые два класса возраста (Brown et al., 1986).

Цель проводимых исследований – моделирование динамики годичного прироста древесины в разнугустотных культурах сосны (*Pinus L.*) с целью поиска оптимальных вариантов густоты посадки с наиболее высоким продуктивностным эффектом и соответственно с более полным поглощением углерода, которые можно рекомендовать в лесохозяйственной практике.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Результаты выполненных исследований основаны на экспериментальных данных, полученных в процессе изучения динамики роста разнугустотных культур сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris L.*), созданных под руководством А. И. Бузыкина в южной тайге Красноярского

края (Большемуртинское лесничество) в 1982 г. Исследования проводились по общепринятым методикам (Побединский, 1966; Моисеев, 1971).

Площадь под опытные посадки, на которой в прошлом произрастали темнохвойные древостои с участием сосны обыкновенной и лиственницы сибирской (*Larix sibirica Ledeb.*), длительное время находилась в сельскохозяйственном обороте. Всего заложено 18 вариантов опыта с густотой от 0.5 до 128.0 тыс. шт./га, т. е. крайние значения густоты начальной посадки различались в 256 раз. К сожалению, один вариант с густотой посадки 8 тыс. шт./га вследствие нарушения был исключен из рассмотрения. Для посадки по квадратной схеме использовали 2-летние сеянцы. Площадь каждого варианта определялась густотой и равнялась 0.01–1.0 га с посадкой не менее 500 растений, для вариантов с густотой от 48.0 до 128.0 тыс. шт./га число посадочных мест увеличивалось соответственно от 10 до 40 %, по конфигурации она близка к квадратной. Участки примыкали друг к другу без разрывов, образуя целостный блок.

Сбор полевых материалов включал сплошной пересчет деревьев на каждой секции, замер высот и диаметров на учетных деревьях (не менее 25 шт.). Высота культур устанавливалась по кривым высот применительно к среднему диаметру насаждения. Запас стволовой древесины вычислялся по таблицам объемов для молодняков сосны (Моисеев, 1971).

В таксационной и статистической обработке использованы данные только прямых (непосредственных) замеров и учетов, затем проанализированы итоговые и средние показатели каждого варианта густоты и дана оценка влияния густоты на рост и продуктивность молодых насаждений в каждом возрасте. При обработке были исключены краевые ряды посадок, контактирующие с разрывами, для устранения опушечных эффектов. Более подробно методика изложена в предыдущих публикациях (Бузыкин и др., 2002).

Исследуемые разнугустотные культуры представляют пример неодинакового использования производительности одних и тех же условий произрастания. Подобного рода данные позволяют их интерпретировать как «густотные кривые» изменения запаса, высоты, диаметра, фитомассы и других параметров (Основы..., 1964; Бузыкин, 1970; Hozumi, Shinozaki, 1970; Hozumi, 1971; Усольцев, 1985). Густотные кривые дают возможность найти параметры, обеспечивающие максимальную биопродуктивность древостоев.

Материалы обмеров культур сосны в разные годы учета (табл. 1–3) включают обобщенную характеристику разногустотных молодняков и текущие и изменения таксационных показателей за 35 лет, начиная с момента их создания (Пшеничникова, 2018).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты моделирования процессов самоизреживания разногустотных культур сосны свидетельствуют об интенсивном самоизреживании

культур с высокой начальной густотой посадки. При начальной густоте посадки 90.0 тыс. шт./га густота культур начиная с 5-летнего возраста, уменьшается с 80.0 до 10.0 тыс. шт./га в возрасте 35 лет, т. е. в 8 раз (табл. 1–3, рис. 1).

С уменьшением начальной густоты посадки темпы самоизреживания снижаются и при начальной густоте ниже 10.0 тыс. шт./га густота культур за аналогичный период времени уменьшается менее чем в 2 раза. Процесс самоизреживания разногустотных культур с начальной густотой посадки свыше 2.0 тыс. шт./га эффек-

**Таблица 1.** Густота и доля отпада в сосновых культурах по вариантам опыта

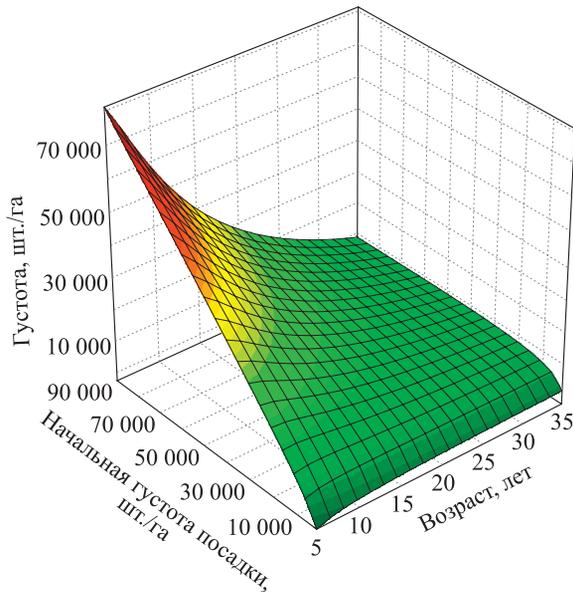
Номер варианта	Возраст, лет							
	2	5	12	15	20	25	30	35
<i>Густота, шт./га</i>								
1	500	387	250	249	246	244	244	244
2	750	550	431	431	431	431	431	431
3	1000	790	566	566	564	564	557	560
4	1500	1200	800	671	600	594	594	588
5	2000	1340	1220	1215	1103	1103	1093	1057
6	3000	2350	2294	2259	2147	2006	2000	2000
7	4000	3510	3333	3287	3186	2519	2333	2300
9	8000	6910	6500	6300	6106	5681	5257	4867
10	10000	8120	7900	7700	7524	6532	6304	5085
11	12000	9730	9500	9300	9049	7220	7073	6268
12	16000	14260	13623	12877	10639	8336	7817	6487
13	24000	19420	17333	16389	11778	9833	7667	6388
14	32000	28800	27362	25019	15949	11338	9146	7181
15	48000	37580	30612	27857	19286	11939	9796	7449
16	64000	58000	40964	35181	25783	13012	10120	6627
17	96000	76030	62449	47143	29184	14694	11837	8367
18	128000	114670	70250	59750	34250	17750	15500	11750
<i>Отпад, %</i>								
1	100	23	50	50	51	51	51	51
2	100	27	43	43	43	43	43	43
3	100	21	43	43	44	44	44	44
4	100	20	47	55	60	60	60	61
5	100	33	39	39	45	45	45	47
6	100	22	24	25	28	33	33	33
7	100	12	17	18	20	37	42	43
9	100	14	19	21	24	29	34	39
10	100	19	21	23	25	35	37	49
11	100	19	21	23	25	40	41	48
12	100	11	15	20	34	48	51	59
13	100	19	28	32	51	59	68	73
14	100	10	14	22	50	65	71	78
15	100	22	36	42	60	75	80	84
16	100	9	36	45	60	80	84	90
17	100	21	35	51	70	85	88	91
18	100	10	45	53	73	86	88	91

**Таблица 2.** Диаметр и высота сосновых культур по вариантам опыта

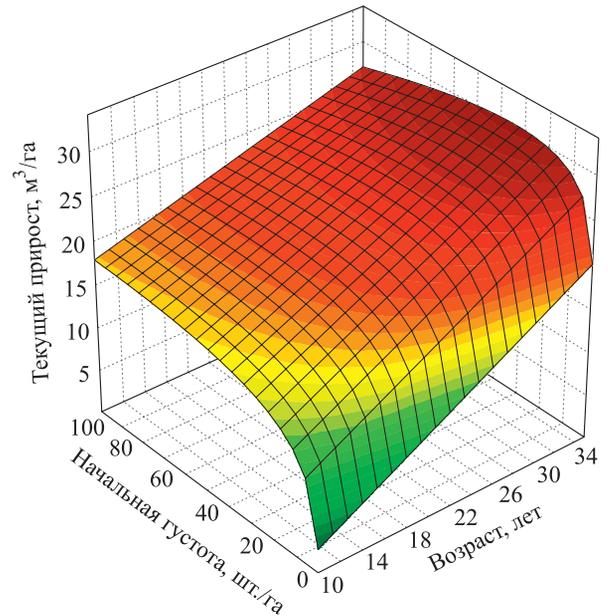
Густота посадки, тыс. шт./га	Средний диаметр, см						Средняя высота, м					
	Возраст, лет											
	12	15	20	25	30	35	12	15	20	25	30	35
0.5	3.2	7.4	15.7	20.8	25.0	28.7	2.5	4.3	7.3	11.1	13.5	14.5
0.75	3.6	8.4	15.4	19.6	23.4	26.9	2.7	4.8	7.8	10.8	13.5	15.0
1.0	4.1	8.8	15.5	19.3	22.4	25.5	2.9	5.1	8.0	11.3	14.2	16.2
1.5	3.7	8.2	14.5	17.9	20.8	24.5	2.9	5.1	8.3	11.6	13.8	16.4
2.0	4.2	7.6	14.0	16.8	18.6	22.5	3.2	5.2	8.7	12.1	14.7	17.1
3.0	4.1	7.8	11.9	13.7	14.8	17.3	3.1	5.5	8.6	11.9	14.2	16.0
4.0	4.1	7.4	10.8	12.4	13.6	15.9	3.1	5.3	8.5	12.4	14.0	15.9
8.0	4.1	6.4	8.5	9.6	10.5	12.8	3.2	5.6	8.0	11.0	13.0	15.1
10.0	3.6	5.7	7.5	8.9	9.5	11.8	3.1	5.2	7.5	10.9	13.2	14.4
12.0	3.4	5.3	7.0	8.2	8.9	10.9	3.1	5.1	7.5	10.5	13.0	14.4
16.0	3.2	5.2	6.5	8.0	8.5	10.5	3.0	5.1	7.5	10.8	12.9	14.1
24.0	3.5	5.1	6.4	8.4	9.2	11.9	3.3	5.4	7.9	11.5	13.4	14.8
32.0	3.3	4.8	6.2	7.5	8.5	11.4	3.2	5.4	8.1	11.6	13.0	14.4
48.0	2.8	4.2	5.4	6.9	7.7	10.7	3.1	5.5	7.5	11.0	12.7	14.1
64.0	2.9	4.1	5.2	6.5	7.2	10.9	3.5	5.6	7.8	11.4	12.7	13.7
96.0	2.6	3.9	4.9	6.3	6.9	9.1	3.3	5.5	7.5	11.3	12.5	13.8
128.0	2.4	3.6	4.7	6.0	6.5	8.8	3.1	5.1	7.3	10.6	12.0	13.4

**Таблица 3.** Запас сосновых культур по вариантам опыта, м<sup>3</sup>

Густота посадки, тыс. шт./га	Возраст, лет					
	12	15	20	25	30	35
0.5	0.41	2.71	16.88	45.97	83.39	116.00
0.75	0.86	6.51	30.80	72.99	124.17	181.01
1.0	1.53	9.57	42.77	96.40	165.09	234.90
1.5	1.61	10.19	41.87	89.42	145.74	223.53
2.0	3.78	16.77	74.61	152.23	223.63	338.38
3.0	6.65	34.33	106.67	181.20	250.60	397.30
4.0	9.33	45.36	137.28	193.52	231.47	388.90
8.0	23.89	84.69	158.65	236.53	319.60	479.40
10.0	23.32	78.14	150.20	230.37	325.30	448.00
12.0	25.22	77.41	157.03	208.72	321.12	468.90
16.0	25.88	84.99	166.10	237.25	323.63	448.50
24.0	38.13	98.33	197.94	260.00	375.67	504.65
32.0	54.72	150.11	243.96	301.20	420.71	502.65
48.0	55.10	125.36	209.25	270.00	370.00	456.40
64.0	77.83	165.35	237.20	310.00	409.88	481.10
96.0	99.92	172.00	230.55	273.00	330.00	404.50
128.0	105.38	176.00	236.00	293.00	361.15	460.00



**Рис. 1.** Зависимость текущей плотности от возраста культур и начальной плотности посадки.



**Рис. 2.** Зависимость текущего ежегодного прироста от начальной плотности посадки культур и возраста.

тивно аппроксимируется сочетанием степенной и логарифмической функций (1):

$$Nt = -25297 + 0.90 \times Nn - 1.3 \times Nn^{(1-1/A)} + 3383 \times \ln(Nn), \quad (1)$$

$$R^2 = 0.98; \sigma = 3277; F = 977,$$

где  $Nt$  – текущая плотность, шт./га;  $Nn$  – начальная плотность посадки, шт./га;  $A$  – возраст культур, лет;  $R^2$  – коэффициент множественной детерминации;  $\sigma$  – стандартная ошибка уравнения шт./га;  $F$  – критерий Фишера.

Поскольку основной задачей формирования компенсационных посадок является их эффективность с позиций депонирования углерода, моделирование динамики прироста разногустотных культур сосны представляет центральную задачу проводимых исследований. Учитывая существенную межвариантную изменчивость всех параметров разногустотных культур, включая вариабельность показателей текущего годовичного прироста, исходные данные по 17 анализируемым вариантам опыта по плотности объединены в пять групп.

В первую группу, средняя плотность которой составила 1.15 тыс. шт./га, вошли варианты с начальной плотностью посадки 0.5, 0.75, 1.0, 1.5, 2.0 тыс. шт./га. Во вторую, третью, четвертую и пятую группы, средняя плотность которых в возрастающем порядке составила 7.4, 24.0, 56.0 и 112.0 тыс. шт./га, вошли варианты с начальной плотностью в (3.0, 4.0, 8.0, 10.0, 12.0); (16.0, 24.0,

32.0); (48.0, 64.0) и (96.0, 128.0) тыс. шт./га соответственно.

Аппроксимация экспериментальных данных комбинацией линейной и логарифмической функций позволила выявить зависимость текущего прироста от начальной плотности посадки и возраста культур, которая выражается следующим уравнением:

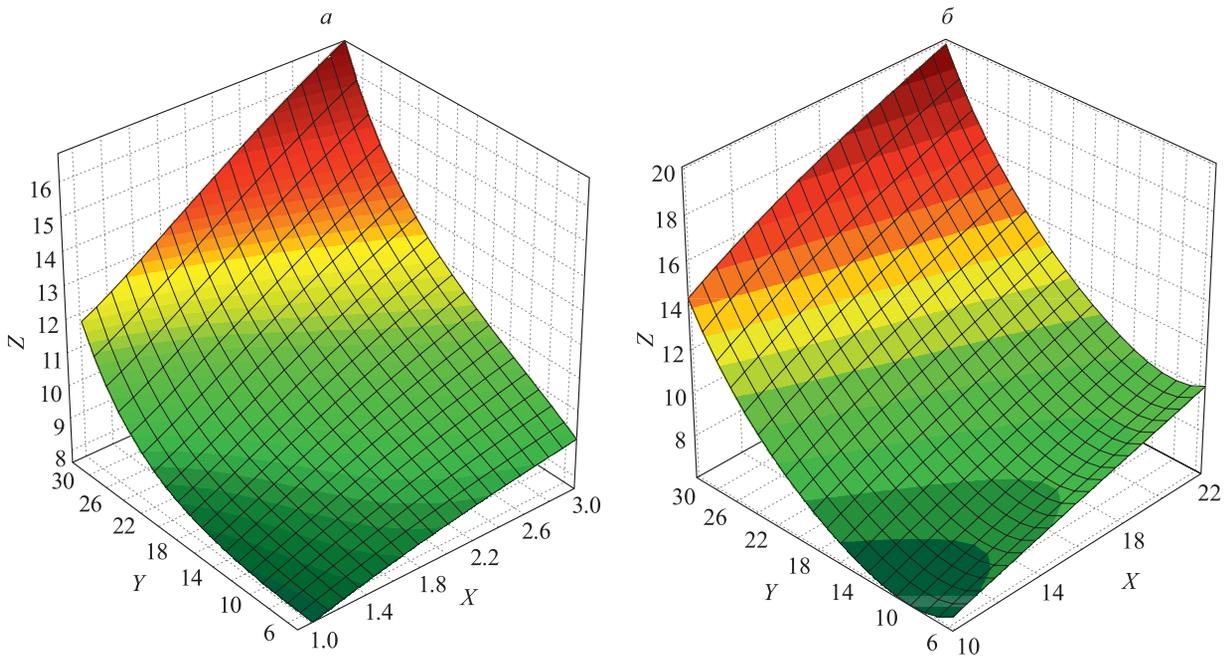
$$Pr = -4.26 + 4 \times \ln(Nn) - 0.0033 \times A \times Nn + 0.7 \times A, \quad (2)$$

$$R^2 = 0.75; \sigma = 3.48; F = 21.01,$$

где  $Pr$  – текущий прирост, м<sup>3</sup>/(га · год);  $Nn$  – начальная плотность посадки, тыс. шт./га;  $A$  – возраст культур, лет;  $R^2$  – коэффициент множественной детерминации;  $\sigma$  – стандартная ошибка уравнения, м<sup>3</sup>/(га · год);  $F$  – критерий Фишера.

Анализ графических форм модели свидетельствует о том, что на начальном этапе роста древостоев наблюдается монотонное увеличение прироста с начальной плотностью посадки, с выходом на плато при плотности свыше 70.0 тыс. шт./га (рис. 2). Однако с возрастом эта тенденция трансформируется с проявлением оптимума начальной плотности посадки, который смещается к меньшей плотности. Так в 20-летнем возрасте максимум прироста наблюдается в вариантах посадки с начальной плотностью от 50.0 до 70.0 тыс. шт./га, а к 30 годам смещается на плотность от 30.0 до 50.0 тыс. шт./га.

Следует ожидать, что с увеличением возраста культур, которые будут выращиваться без



**Рис. 3.** Зависимость прироста ( $Z$ ) от текущей густоты ( $X$ ) и возраста ( $Y$ ) при начальной густоте посадки 3.0 ( $a$ ) и 90.0 ( $b$ ) тыс. шт./га.

ухода, начальная густота посадки должна быть значительно ниже наблюдаемых в этом примере оптимумов. В этой связи практический интерес представляет также зависимость прироста от текущей густоты насаждений. С этой целью исходные данные вновь были обработаны методом множественного регрессионного анализа с учетом текущей густоты исследуемых древостоев.

В результате обработки средних сгруппированных по густоте данных получена зависимость среднего текущего периодического прироста древостоев, от их возраста, начальной густоты посадки и текущей густоты древостоя выраженная показательной-степенной функцией:

$$Pr = 7.07 + 0.266 \times Nt + 0.527 \times A^{(1-1/Nt)} + 0.034 \times 5^{(A/10)} - 0.14 \times Nn^{(1-1/A)}, \quad (3)$$

$$R^2 = 0.71; \quad \sigma = 2.7; \quad F = 12.4,$$

где  $Nt$  – текущая густота древостоя, тыс. шт./га; остальные обозначения см. в (2).

Учет текущей густоты, образовавшейся в процессе самоизреживания разнугустотных культур при оценке текущего прироста позволил повысить точность определения этого показателя. Стандартная ошибка снизилась с 3.48 до 2.7 м<sup>3</sup>/(га · год) (модель 2, 3). Графические формы модели (3) свидетельствуют об увеличении прироста с возрастом и текущей густотой,

как при низких, так и при высоких значениях начальной густоты посадки (рис. 3).

Следует отметить, что тенденция увеличения прироста с густотой ослабевает при текущей густоте выше 20.0 тыс. шт./га (см. рис. 2). Это свидетельствует о неких пределах увеличения прироста с повышением густоты стояния деревьев, особенно в культурах старше 20 лет.

В исследуемом интервале возрастов прослеживается также тенденция повышения прироста с увеличением начальной густоты посадки, однако она сохраняется только до значения в 30.0 тыс. шт./га. Дальнейшее увеличение начальной густоты посадки не сопровождается соответствующей реакцией текущего прироста, особенно с увеличением возраста лесных культур. Все это – проявление обострения конкуренции растений за ресурсы среды, что необходимо учитывать при создании лесных культур целевого назначения. Вероятно, что высокие темпы депонирования углерода на начальном этапе создания культур повышенной густоты могут сохраняться при условии периодических уходов регулирующих густоту насаждений.

Анализ динамики прироста разнугустотных культур с учетом процессов естественного самоизреживания (рис. 1) свидетельствует о том, что в 15-летнем возрасте наибольший прирост отмечался в культурах с максимальной густотой посадки (рис. 4).

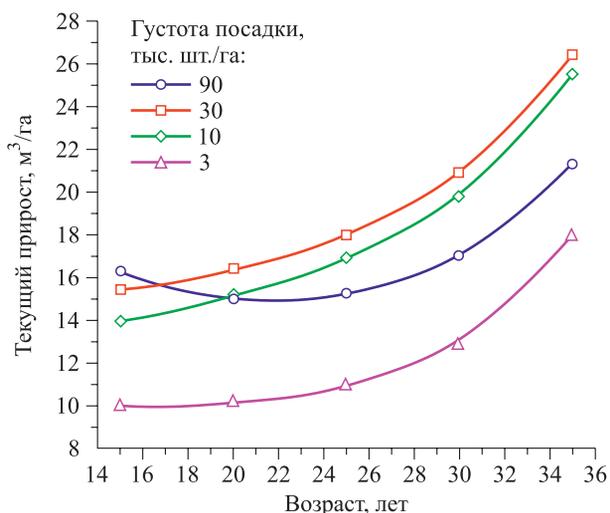


Рис. 4. Текущий прирост разногустотных культур при различной начальной густоте посадки.

По мере роста насаждений и усиления конкурентных отношений за ресурсы среды в культурах с максимальной густотой наметилась тенденция снижения прироста, проявившаяся в интервале возрастов от 15 до 20–24 лет. Затем в результате снижения конкуренции вследствие самоизреживания перегущенных культур их прирост стал повышаться, однако темпы его роста отставали от таковых у культур с меньшей густотой начальной посадки. По-видимому, оптимальной для молодняков сосны с точки зрения получения максимального прироста будет густота от 10 до 30 тыс. шт./га, хотя по мере роста, безусловно, потребуется проведение рубок ухода и снижение густоты до оптимумов в соответствующем возрасте (Онучин и др., 2022). Очевидно, что полученные модели, скорее всего, демонстрируют тенденции изменения прироста с учетом начальной густоты и возраста культур, хотя стандартные ошибки моделей вполне приемлемы для прогнозных оценок прироста древесины.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты модельных экспериментов, которые согласуются с экспериментальными данными, позволяют утверждать, что для создания культур, обеспечивающих максимальное депонирование углерода, начальная густота посадки должна находиться в диапазоне от 10.0 до 20.0 тыс. шт./га. Разумеется, культуры с большей начальной густотой посадки на начальных этапах роста будут обеспечивать лучший углерод депонирующий эффект, однако в возрасте 15–20 лет потребуется проведение рубок ухода,

направленных на снижение текущей густоты, по крайней мере, до 10.0 тыс. шт./га с повторным уходом через 10–15 лет и доведением густоты культур к 40-летнему возрасту, по крайней мере, до 5.0 тыс. шт./га.

Сложность лесокультурных работ состоит в том, что нужно учитывать не только назначение лесных культур, но и их биологическую устойчивость. При соблюдении этого принципа лесоразведения искусственные насаждения будут наиболее полно отвечать своему назначению.

Динамика годовичного прироста древесины, отражающая поглощение лесами атмосферного углерода, может служить научной основой обоснования вариантов лесопользования на основе модели интенсивного использования и воспроизводства лесов, гармонично сочетающих разные способы рубки с принципами устойчивого лесопользования в целях увеличения секвестра углерода.

Хотя основная цель компенсаций за выбросы углерода заключается в сокращении глобальных выбросов углерода, проекты лесовосстановления могут привести также к оздоровлению окружающей среды и улучшить качество воздуха, воды, условия жизни и здоровья населения. Эти дополнительные улучшения составляют сопутствующие выгоды и могут учитываться при оценке и сравнении лесных проектов, связанных с компенсацией выбросов углерода.

*Исследование выполнено в рамках проекта «Развитие научно-образовательного Центра мониторинга климатически активных веществ (Углерод в экосистемах: мониторинг) в рамках Федеральной научно-технической программы в области экологического развития Российской Федерации и климатических изменений на 2021–2030 годы».*

*Авторы выражают благодарность научному сотруднику лаборатории лесоведения и почвоведения ИЛ СО РАН Д. С. Собачкину за помощь в сборе и обработке полевого материала.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бузыкин А. И. О географических и эдафо-фитоценологических факторах продуктивности лесов // Вопросы лесоведения. Красноярск, 1970. Т. 1. С. 80–91.
- Бузыкин А. И. О продуктивности лесов и уровнях регулирования // Проблемы лесоведения Сибири. М.: Наука, 1977. С. 7–24.
- Бузыкин А. И., Пшеничникова Л. С., Суховольский В. Г. Густота и продуктивность древесных ценозов. Новосибирск: Наука, 2002. 151 с.

- Государственный* (национальный) доклад о состоянии и использовании земель Российской Федерации за 1995 год. М.: Русслит, 1996. 120 с.
- Кретов Е. С.* Эколого-географические ареалы сосны в культуре с оптимальной начальной густотой посадки на Европейской части СССР // *Лесная геоботаника и биология древесных растений*. Брянск, 1975. Вып. 3. С. 86–97.
- Кузьмичев В. В., Пшеничникова Л. С.* Влияние плотности популяций сосны на изменчивость размеров деревьев // *Сиб. лесн. журн.* 2014. № 3. С. 150–156.
- Моисеев В. С.* Таксация молодняков. Л.: ЛЛТА, 1971. 344 с.
- Онучин А. А., Собачкин Д. С., Собачкин Р. С., Петренко А. Е., Иванов В. В.* Реакция средневозрастных сосняков Красноярской лесостепи на внесение азотных удобрений и изреживание // *Сиб. лесн. журн.* 2022. № 3. С. 15–23.
- Основы лесной биогеоценологии* / Под ред. В. Н. Сукачева и В. Н. Дылиса. М.: Наука, 1964. 574 с.
- Побединский А. В.* Изучение лесовосстановительных процессов. М.: Наука, 1966. 60 с.
- Пшеничникова Л. С.* Эффективность разногустотного режима лесовыращивания культур сосны в южной тайге Средней Сибири // *Хвойные бореальной зоны*. 2018. Т. 36. № 6. С. 517–523.
- Региональные проблемы экосистемного лесоводства* / Под ред. А. А. Онучина. Красноярск: Ин-т леса им. В. Н. Сукачева СО РАН, 2007. 330 с.
- Родин А. Р.* Культуры ели на вырубках. М.: Лесн. пром-сть, 1977. 169 с.
- Рубцов В. И.* Культуры сосны в лесостепи центрально-черноземных областей. М.: Лесн. пром-сть, 1964. 316 с.
- Савич Ю. Н.* О росте, продуктивности и устойчивости сосновых культур, созданных при различной густоте посадки // *Вопр. лесн. таксации*. 1978. Вып. 213. С. 27–38.
- Тимофеев В. П.* Лесные культуры лиственницы. М.: Лесн. пром-сть, 1977. 216 с.
- Тимофеев-Ресовский Н. В., Воронцов Н. Н., Яблоков А. В.* Краткий очерк теории эволюции. М.: Наука, 1969. 408 с.
- Углерод в экосистемах лесов и болот России* / Под ред. В. А. Алексеева и Р. А. Бердси. Красноярск, 1994. 170 с.
- Усольцев В. А.* Оценка показателей продуктивности в биогруппах разной густоты // *Лесоведение*. 1985. № 2. С. 62–72.
- Усольцев В. А., Маленко А. А.* Лесные культуры разной начальной густоты. Сообщение 2. Анализ опытных посадок сосны обыкновенной // *Эко-потенциал*. 2014. № 3 (7). С. 34–47.
- Экологические проблемы поглощения углекислого газа посредством лесовосстановления и лесоразведения в России* / А. С. Исаев, Г. Н. Коровин, В. И. Сухих, С. П. Титов, А. И. Уткин, А. А. Голуб, Д. Г. Замолотчиков, А. А. Пряжников. М.: Центр экол. политики, 1995. 156 с.
- Brown S., Lugo A., Chapman J.* Biomass of tropical tree plantations and its implications for the global carbon budget // *Can. J. For. Res.* 1986. V. 16. N. 2. P. 390–394.
- Hozumi K.* Studies on the frequency distribution of the weight of individual trees in a forest stand. 3. A beta-type distribution // *Jap. J. Ecol.* 1971. V. 21. N. 3–4. P. 152–167.
- Hozumi K., Shinozaki K.* Studies on the frequency distribution of the weight of individual trees a forest stand. II. Exponential distribution // *Jap. J. Ecol.* 1970. V. 20. N. 1. P. 1–9.

## THE GROWTH SPECIFICS OF PINE CROPS OF VARIOUS DENSITY IN THE SIBERIAN SOUTHERN TAIGA

L. S. Pshenichnikova, A. A. Onuchin, R. S. Sobachkin, A. E. Petrenko

*V. N. Sukachev Institute of Forest, Russian Academy of Science, Siberian Branch*

*Federal Research Center Krasnoyarsk Scientific Center, Russian Academy of Sciences, Siberian Branch  
Akademgorodok, 50/28, Krasnoyarsk, 660036 Russian Federation*

---

E-mail: larisa-24pshenichnikova@yandex.ru, onuchin@ksc.krasn.ru, romans@ksc.krasn.ru, alcorsci@bk.ru

Received 03.11.2021

The dynamics of forest inventory indicators, attrition and wood growth of 35-year-old pine *Pinus sylvestris* L. crops with various density are analyzed, Pine crops were created in 1982 by V. N. Sukachev Institute of Forest Russian Academy of Sciences, Siberian Branch under the leadership of A. I. Buzykin on former agricultural lands in Bolshemurtinsky district of Krasnoyarsk Krai. The initial density of the stands varied in a wide range from 0.5 to 128.0 thousand trees per ha. The assessment of the stand density influence on the growth and productivity of young pine stands at the age of 2, 5, 12, 15, 20, 25, 30 and 35 years old was carried out. It has been established that since the age of five, the process of intensive self-thinning of trees has been observed, at initial planting density 90.0 thousand trees/ha the density decreased to 10 thousand trees/ha by the age of 35 years. At the initial density less than 10 thousand trees/ha the self-thinning intensity is significantly lower and the stand density has decreased by less than 2 times over the same period. It is shown that at the initial stage of stand growth there is a growth increase with the initial planting density, reaching the plateau at a density of over 70.0 thousand trees/ha. With age reaching the plateau occurs with the lower initial density. At the age of 20, the maximum increase was at the initial density from 50.0 to 70.0 thousand trees/ha, by the age of 30 it shifted to a density range from 30.0 to 50.0 thousand trees/ha. The relationship between the current annual increment, age, and the initial and actual densities of pine crops has been established. In the age range studied there is a tendency of increasing the increment with age, although for the crops with the initial density higher than 90 thousand trees per ha in the range of 15 to 22 years the decrease of annual increment is observed, which is evidently connected to the escalating of concurrent relations in cenosis. Thus, it can be suggested that high rates of carbon deposition at the initial stage of high-density stands creation can be maintained under the condition of periodic thinning, regulating the stand density.

**Keywords:** *carbon deposition, compensatory planting, pine crops, density, age dynamics, increment, modeling.*

**How to cite:** *Pshenichnikova L. S., Onuchin A. A., Sobachkin R. S., Petrenko A. E. The growth specifics of pine crops of various density in the Siberian southern taiga // Sibirskij Lesnoj Zhurnal (Sib. J. For. Sci.). 2022. N. 3. P. 24–33 (in Russian with English abstract).*

УДК 630\*25:630\*228.12

## ОСОБЕННОСТИ РОСТА И ПРОДУКТИВНОСТИ СОСНОВЫХ МОЛОДНЯКОВ, СФОРМИРОВАННЫХ ИЗ ДЕРЕВЬЕВ РАЗЛИЧНОГО ЦЕНОТИЧЕСКОГО СТАТУСА

Р. С. Собачкин, Д. С. Собачкин, А. Е. Петренко

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

E-mail: romans@ksc.krasn.ru, dens@ksc.krasn.ru, alcorsci@bk.ru

Поступила в редакцию 19.10.2021 г.

Представлены результаты формирования в Красноярской лесостепи насаждений из перегушенных 15-летних сосновых молодняков (первоначальная густота деревьев 35.6 тыс. шт./га) посредством проведения целевой рубки, направленной на снижение их густоты и сохранение в трех ценозах только деревьев определенного ценотического положения (господствующие, согосподствующие и угнетенные), с целью получения информации о возможном выравнивании таксационных показателей в процессе их роста. Установлено, что господствующие деревья сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) после проведения рубки имели густоту 4.3 тыс. шт./га, характеризовались наилучшими показателями роста (средняя высота и средний диаметр) и сохранили эту тенденцию на протяжении всего периода наблюдений. Через 7 лет их средний диаметр увеличился с  $4.8 \pm 0.1$  до  $9.4 \pm 0.2$  см, средняя высота – с  $4.8 \pm 0.1$  до  $8.1 \pm 0.1$  м, стволовой запас древесины – с 28.31 до 141.63 м<sup>3</sup>/га, относительная полнота – с 0.51 до 1.27. Густота согосподствующих деревьев после рубки снизилась до 6.6 тыс. шт./га, средний диаметр увеличился с  $2.3 \pm 0.1$  до  $6.1 \pm 0.1$  см, средняя высота увеличилась с  $3.4 \pm 0.1$  до  $5.7 \pm 0.1$  м, стволовой запас – с 7.92 до 60.06 м<sup>3</sup>/га, относительная полнота насаждения – в 3.7 раза (1.00). Угнетенные деревья после проведения рубки проходили долгий (1–2-летний) период адаптации, имели диспропорциональный рост в высоту и сниженный по диаметру (относительная высота 244). Густота их после рубки уменьшилась до 6.3 тыс. шт./га, средний диаметр через 7 лет после рубки увеличился с  $0.9 \pm 0.1$  до  $4.2 \pm 0.1$  см, средняя высота – с  $2.3 \pm 0.1$  до  $3.8 \pm 0.1$  м, запас древесины – с 1.09 до 17.23 м<sup>3</sup>/га, относительная полнота – с 0.07 до 0.69.

**Ключевые слова:** сосна обыкновенная, молодняки, рубки прореживания, густота, господствующие деревья, прирост древесины.

DOI: 10.15372/SJFS20220304

### ВВЕДЕНИЕ

В процессе роста и развития дерева находятся в разнообразных взаимодействиях друг с другом и окружающей средой. Факторы, влияющие на формирование древостоев, делятся на биотические (преимущественно конкуренция) и абиотические (климатические, эдафические и др.). Конкурентные взаимоотношения наиболее остро проявляются в перегушенных древесных ценозах в борьбе за ресурсы среды (свет, почвенное питание) и направлены на отмирание лишних, отстающих в росте и развитии древесных растений. Конкурентными взаимоотношениями между деревьями обусловлена диффе-

ренциация (расчленение деревьев в древостое по росту и развитию) деревьев в насаждении. Этот процесс может проявляться с первых лет жизни древесных растений и различаться по продолжительности.

В практике лесокультурного дела и лесного хозяйства проводится отбор посадочного материала при посадке или рубках ухода в молодняках (Наставление..., 1994) с оставлением деревьев с лучшими биометрическими показателями, так как уже в раннем возрасте у древесных особей проявляется потенциал к скорости роста и развития, и эта тенденция сохранится в будущем. По данному принципу все древесные особи с худшими показателями роста подлежат

отбраковке при посадке или удалению из насаждения при рубках ухода, хотя, возможно, эти особи могли бы догнать со временем «лучшие» при создании благоприятных условий. В литературе недостаточно информации о росте насаждений, сформированных только из деревьев определенного ценоотического положения, в том числе ценозов из угнетенных деревьев, их потенциальной продуктивности, успешном росте и способности сформировать жизнеспособное насаждение или их полной (или частичной) гибели в течение периода адаптации (Amateis et al., 1997; Нуутиäinen et al., 2005; Zhao et al., 2010).

Целью исследования является получение информации о возможном нивелировании в процессе роста таксационных показателей сосновых молодняков, сформированных только из деревьев определенного ценоотического положения (господствующие, согосподствующие и угнетенные) целевой рубкой в возрасте 15 лет на специально смоделированном эксперименте.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследования проведены в сосновых молодняках экспериментального хозяйства «Погорельский бор», территориально входящих в Красноярскую островную лесостепь (56°22' с. ш., 92°57' в. д.). Абсолютные высоты колеблются в пределах 250–300 м. Климат резко континентальный, средняя годовая температура воздуха 0.5 °С. Продолжительность вегетационного периода 150 дней. Среднегодовое количество осадков 400 мм (Агроклиматический справочник..., 1961).

Экспериментальный объект представляет собой пройденные рубками сосновые молодняки естественного происхождения, сформированные на землях, вышедших из сельскохозяйственного использования. Рубка в молодняках проводилась в начале вегетационного сезона по принципу сохранения на пробных площадях (пп) деревьев определенного ценоотического положения (рис. 1, а–в) и снижения первоначальной густоты ценозов до пропорционального размера площади почвенного питания размерам деревьев, не допуская условий свободного роста: пп 1 – деревья лидеры (господствующие), пп 2 – деревья средних размеров (согосподствующие) и пп 3 – деревья, значительно отставшие в росте (угнетенные). Деревья на каждой пп рубили ручным способом по принципу равно-

мерного размещения оставшихся, с аккуратным удалением срубленных и последующим их измельчением мульчерным агрегатом. Размер пп варьировал в пределах 0.036–0.038 га.

До проведения рубки исходный сосновый молодняк имел следующие таксационные характеристики: формула состава насаждения 10С, средний возраст – 15 лет, средний диаметр –  $2.6 \pm 0.1$  см, средняя высота –  $4.2 \pm 0.1$  м, густота – 35.6 тыс. шт./га, относительная полнота – 1.4. На каждой пп проводился сплошной пересчет всех деревьев по диаметрам на высоте



**Рис. 1.** Молодняки сосны *Pinus* L. после проведения рубки.

Деревья: а – господствующие; б – согосподствующие; в – угнетенные.

1.3 м от поверхности почвы, с замером высот и диаметров у модельных деревьев (не менее 25 шт. на каждую пп). Средний диаметр определялся как средневзвешанная величина через сумму площадей поперечных сечений всех деревьев на пп, средняя высота – по кривым высот через средний диаметр насаждения. Стволовой запас деревьев вычислялся по таблицам объемов для молодняков сосны (Моисеев, 1971). Полученные экспериментальные данные обрабатывались в пакете анализа Microsoft Excel 2013.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Сосновый молодняк до проведения рубки имел высокую начальную плотность деревьев (35.6 тыс. шт./га). Деревья испытывали депрессию в росте и развитии из-за острой конкуренции. При таких условиях роста у них наблюдалась диспропорция в приросте по высоте и диаметру (относительная высота Н/Д = 163). Относительная высота характеризует степень сопряженного роста в высоту и по диаметру, отношение высоты древостоя к его диаметру на высоте груди (Эйтинген, 1918; Высоцкий 1962). Данный показатель фиксирует особенности роста в высоту и по диаметру как результат реакции деревьев на ценоотические условия роста. На увеличенную плотность ценоза деревья реагируют повышенной относительной высотой, максимальные значения относительных высот соответствуют тонким и высоким деревьям, минимальные – крупным и низким.

Высокая относительная высота свидетельствует о функционировании ценоотического механизма регуляции роста и численности деревьев, чем больше плотность ценоза, тем раньше и с большей интенсивностью происходит умень-

шение количества деревьев в процессе естественного изреживания. При высокой плотности конкуренция такова, что у значительного числа деревьев наблюдается диспропорция роста в высоту и по диаметру, вследствие чего происходит отпад этих особей.

В результате проведения рубок в сосновых молодняках на трех пп плотность деревьев была значительно снижена и сформированы сосновые ценозы из деревьев определенного ценоотического положения, равномерно размещенных по площади. Конкуренция между деревьями снизилась, площадь почвенного питания и светового режима улучшились, что создало оптимальные условия для дальнейшего роста и формирования сосновых ценозов.

Насаждение на пп 1 было представлено самыми крупными особями, деревьями-лидерами (господствующими). После проведения рубок плотность их уменьшилась в 8.2 раза и составила 4.3 тыс. шт./га. Средний диаметр деревьев увеличился за счет удаления особей из низших ступеней (на 84.6 % по сравнению с дорубочным показателем ( $2.6 \pm 0.1$  см) и составил  $4.8 \pm 0.1$  см) (рис. 2), средняя высота деревьев возросла незначительно – с  $4.2 \pm 0.1$  до  $4.8 \pm 0.1$  м (рис. 2). Относительная полнота древесного яруса уменьшилась в 2.7 раза и установлена 0.51. Н/Д уменьшилась со 163 (до рубки) до 100.

Через 4 года после проведения рубки плотность господствующих деревьев не изменилась, средний диаметр увеличился на 64.6 % и составил  $7.9 \pm 0.1$  см, средняя высота достигла  $6.5 \pm 0.1$  м. Относительная полнота соснового ценоза возросла в 2.1 раза, что составило 1.06. Н/Д насаждения снизилась до 83, что свидетельствует о снижении роста в высоту по отношению к диаметру.

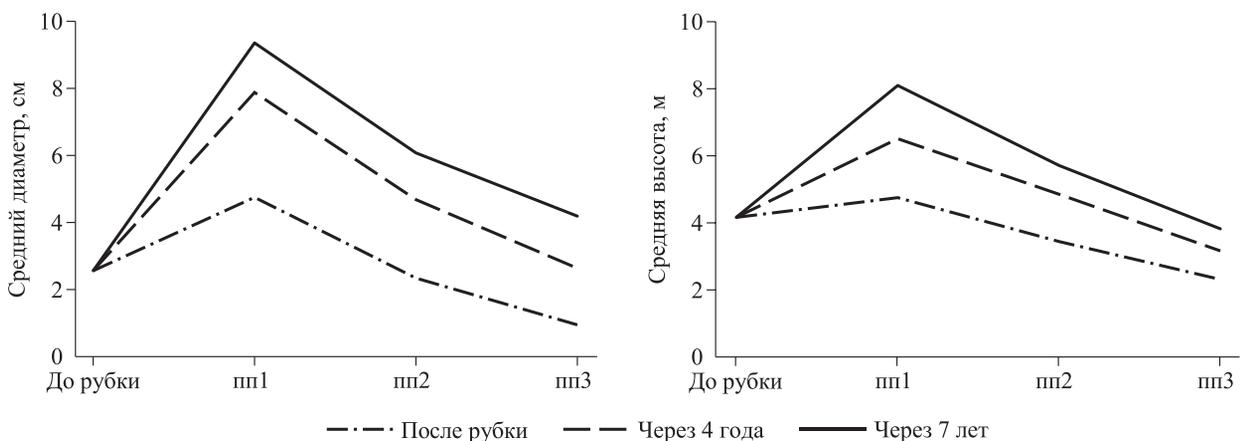


Рис. 2. Таксационные показатели в молодняках сосны до рубки и после нее.

Через 7 лет после рубки средний диаметр господствующих деревьев на пп 1 увеличился в 1.9 раза и составил  $9.4 \pm 0.2$  см, средняя высота – в 1.7 раза ( $8.1 \pm 0.1$  м). Полнота насаждения составила 1.27. Относительная высота соснового ценоза за последние 3 года существенно не изменилась (87), что, вероятно, связано с относительным «стабилизированием» пропорциональности роста деревьев по высоте и диаметру.

Рубкой на пп 2 сформировано насаждение из средних по размеру (согосподствующих) деревьев. После ее проведения густота согосподствующих деревьев уменьшилась в 5.4 раза и составила 6.6 тыс. шт./га. Средний диаметр согосподствующих деревьев ( $2.3 \pm 0.1$  см) в ценозе близок к среднему диаметру насаждения до рубки ( $2.6 \pm 0.1$  см) из-за удаления из древостоя крупных (господствующих) и мелких (угнетенных) деревьев сосны. Средняя высота уменьшилась до  $3.4 \pm 0.1$  м, относительная полнота составила 0.27. Средняя Н/Д согосподствующих деревьев возросла до 147, что показывает сохранение увеличенного роста в высоту деревьев по отношению к их диаметрам.

Густота согосподствующих деревьев через 4 года после проведения рубки уменьшилась с 6.6 до 6.1 тыс. шт./га. Это объясняется асимметричным и неравномерным строением крон некоторых согосподствующих деревьев вследствие изначальной чрезмерной загущенности насаждения, что в результате привело к их гибели в зимний период с обильными снегопадами и формированием снеговых «шапок» на кронах деревьев. Их средний диаметр увеличился более чем в 2.0 раза – до  $4.7 \pm 0.1$  см, средняя высота – на 1.5 м и составила  $4.9 \pm 0.1$  м, полнота соснового молодняка – в 2.5 раза и составила 0.67. Средняя относительная высота уменьшилась со 147 до 104, что демонстрирует увеличение роста согосподствующих деревьев по диаметру.

В последующие 3 года густота согосподствующих деревьев существенно не изменилась (6.1 тыс. шт./га), кроме отпада нескольких деревьев на пп. Средний диаметр деревьев на пп 2 через 7 лет после рубки увеличился в 2.7 раза и составил  $6.1 \pm 0.1$  см, средняя высота деревьев возросла в 1.7 раза ( $5.7 \pm 0.1$  м). Полнота ценоза достигла 1.00. Средняя относительная высота насаждения продолжала уменьшаться (94), что показывает продолжающееся увеличение роста деревьев по диаметру.

Насаждение из угнетенных деревьев сосны было сформировано на пп 3. Густота деревьев

после проведения рубки уменьшилась в 5.7 раза и составила 6.3 тыс. шт./га, средний диаметр деревьев – с  $2.6 \pm 0.1$  см (до рубки) до  $0.9 \pm 0.1$  см за счет полного удаления из ценоза крупных, средних по размеру деревьев, а также части тонкомерных деревьев для значительного снижения густоты молодняка, средняя высота древостоя – в 1.8 раза ( $2.3 \pm 0.1$  м). Необходимо отметить, что оставшиеся после рубки угнетенные деревья, изначально произрастая длительное время практически под «пологом» господствующих и согосподствующих деревьев, имели плохо сформированную, асимметричную, состоящую, как правило, из 3–5 ветвей крону. Ассимиляционный аппарат развит по теневому типу. Совокупность этих факторов оказала влияние на процесс долгой адаптации (1–2 года) угнетенных деревьев к новым условиям, главным образом повышенной освещенности. Угнетенные деревья характеризовались диспропорциональным ростом в высоту, который многократно превышал прирост по диаметру (средняя Н/Д = 244), по этой причине у некоторых деревьев появился сильный наклон ствола к поверхности почвы после рубки. Полнота угнетенных деревьев составила 0.07.

Через 4 года после рубки густота угнетенных деревьев уменьшилась до 5.9 тыс. шт./га. Часть их не адаптировалась к новым условиям и перешла в отпад. Средний диаметр увеличился в 2.8 раза и достиг изначального (дорубочного) показателя ( $2.6 \pm 0.1$  см), средняя высота – на 0.9 м по сравнению с предыдущим показателем и составила  $3.2 \pm 0.1$  м, полнота – в 5.0 раза (0.35). Показатель Н/Д уменьшился в 2.0 раза и составил 120, что свидетельствует об изменении стратегии роста угнетенных деревьев после рубки: его увеличение по диаметру по отношению к высоте.

Через 7 лет после рубки на пп 3 густота угнетенных деревьев не изменилась (5.9 тыс. шт./га). Средний их диаметр увеличился до  $4.2 \pm 0.1$  см (в 4.6 раза). За весь период наблюдений средняя высота деревьев не достигла первоначального (дорубочного) показателя ( $4.2 \pm 0.1$  м) и составила  $3.8 \pm 0.1$  м. Полнота установлена 0.69, что превысило предыдущее значение в 2.0 раза. Средняя Н/Д насаждения продолжала снижаться и составила 91. Это сопоставимо со значениями господствующих и согосподствующих деревьев за указанный период, т. е. пропорциональность роста по высоте и диаметру угнетенных деревьев приблизилась к «нормальному» типу несмотря на значительное отставание по высоте и диаметру в абсолютном выражении.

Стволовой запас древесины господствующих деревьев сосны через 7 лет после рубки увеличился с 28.31 до 141.63 м<sup>3</sup>/га, что является наилучшим показателем в абсолютном значении. Согосподствующие деревья увеличили запас древесины в 7.6 раза (60.06 м<sup>3</sup>/га), у угнетенных деревьев за аналогичный период наблюдений он вырос с 1.09 до 17.23 м<sup>3</sup>/га (в 15.8 раза).

Наибольший средний прирост стволовой древесины за 4-летний период отмечен у господствующих деревьев – 10.6 м<sup>3</sup>/(га · год), наименьший – у угнетенных деревьев – 2.0 м<sup>3</sup>/(га · год). У согосподствующих деревьев он составил 7.9 м<sup>3</sup>/(га · год). Низкий прирост стволовой древесины у угнетенных деревьев объясняется их долгой адаптацией в первые 1–2 года после проведенной рубки, а также общей низкой продуктивностью.

За последующий 3-летний период наблюдений прирост стволовой древесины у господствующих деревьев увеличился на 122.9 % и составил 23.6 м<sup>3</sup>/(га · год), у угнетенных – соответственно на 36.6 % и 2.7 м<sup>3</sup>/(га · год). У согосподствующих деревьев отмечено его снижение на 11.1 % (7.0 м<sup>3</sup>/(га · год)), что, вероятно, связано с отсутствием в ценозе ярко выраженных доминантных и отстающих в росте деревьев и началом проявления конкурентных взаимоотношений вследствие более высокой густоты деревьев среди рассматриваемых молодняков.

Наибольший отпад за начальный 4-летний период отмечен у согосподствующих деревьев – 0.11 м<sup>3</sup>/(га · год), наименьший – у угнетенных – 0.03 м<sup>3</sup>/(га · год). За последующий 3-летний период он установлен только у согосподствующих деревьев – 0.03 м<sup>3</sup>/(га · год). За все время наблюдений отпад деревьев на пп 1 отсутствовал.

Таким образом, господствующие деревья имели наибольший средний прирост за весь период наблюдений (7 лет), с максимальным значением за последние 3 года. Угнетенные деревья, изначально характеризующиеся депрессивным ростом под «пологом молодняка», в последние 3 года адаптировались к изменившимся условиям, что показывает увеличение среднего прироста. Возможно предположить, что темп их прироста в дальнейшем будет приближаться к господствующим и согосподствующим деревьям, что обеспечивается низкой конкуренцией и доступностью почвенного питания. Снижение прироста согосподствующих деревьев за последний 3-летний период свидетельствует о начале проявления конкуренции между деревьями, это косвенно подтверждает наличие отпада.

В таких условиях деревьям, имеющим близкие биометрические параметры и занимающим одинаковое ценотическое положение, трудно перегнать в росте «соседние» особи, что в итоге приводит к стрессовому состоянию всего ценоза и растянутому по времени процессу дифференциации деревьев.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На экспериментальном объекте исследований прослежен процесс адаптации 15-летних сосновых молодняков после проведения целевой рубки, направленной на снижение густоты и формирование ценозов из деревьев определенного ценотического положения (господствующие, согосподствующие и угнетенные).

Установлено, что после проведения рубок господствующие деревья имели самые высокие средние таксационные показатели за 7-летний период наблюдений, темп роста по диаметру за последние 3 года снизился по сравнению с ростом в высоту. Наибольший средний прирост древесины господствующих деревьев установлен за последний 3-летний период.

Согосподствующие деревья сосны характеризовались стабильным ростом в высоту и по диаметру, с незначительным снижением этих показателей за последний 3-летний период. Густота деревьев через 4 года после рубки снизилась в результате отпада деревьев на 6.4 %, за последующие 3 года уменьшилась еще на 0.5 % вследствие более раннего проявления конкуренции. Это предположение также подтверждается снижением среднего прироста согосподствующих деревьев за последние 3 года.

Угнетенные деревья, изначально произрастающие в стрессовых условиях на грани отмирания, вызванных высокой густотой и острой конкуренцией, в первые 2 года после рубки смогли адаптироваться к новым условиям. Их рост по диаметру увеличился, изменилась стратегия роста деревьев (относительная высота уменьшилась в 2.7 раза, приблизившись к показателям других исследуемых ценозов). За 4-летний период после рубки густота деревьев уменьшилась на 5.8 % и в дальнейшем не изменялась. Средний прирост древесины за последние 3 года показал положительную тенденцию, в сравнение с предыдущим показателем за первые 4 года. Все это свидетельствует об увеличении роста угнетенных деревьев после снижения их густоты. Необходимо отметить, что предположение о возможности нивелирования таксационных по-

казателей в процессе роста угнетенных деревьев и формирования жизнеспособного, устойчивого насаждения требует проведение дополнительных исследований, не исключая вероятности проявления генетического фактора.

*Исследование выполнено в рамках проекта «Развитие научно-образовательного Центра мониторинга климатически активных веществ (Углерод в экосистемах: мониторинг) в рамках Федеральной научно-технической программы в области экологического развития Российской Федерации и климатических изменений на 2021–2030 годы».*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

*Агроклиматический справочник по Красноярскому краю и Тувинской АО. Л.: Гидрометеоздат, 1961. 268 с.*

- Высоцкий К. К.* Закономерности строения смешанных древостоев. М.: Лесн. пром-ть, 1962. 177 с.
- Наставление по рубкам ухода в лесах Восточной Сибири.* Приказ Федеральной службы лесного хозяйства России от 30.03.1994 № 70. М.: Фед. служба лесн. хоз-ва России, 1994.
- Моисеев В. С.* Таксация молодняков. Л.: ЛЛТА, 1971. 344 с.
- Эйтинген Г. Р.* Влияние густоты древостоя (посадки) на рост насаждения // Лесн. хоз-во. 1918. Вып. 6–8. С. 1–38.
- Amateis R. L., Burkhardt H. E., Liu J.* Modeling survival in juvenile and mature loblolly pine plantations // For. Ecol. Manag. 1997. V. 90. Iss. 1. P. 51–58.
- Hyytiäinen K., Tahvonen O., Valsta L.* Optimum juvenile density, harvesting, and stand structure in even-aged scots pine stands // For. Sci. 2005. V. 51. N. 2. P. 120–133.
- Zhao D., Kane M., Borders B. E.* Development and applications of the relative spacing model for loblolly pine plantations // For. Ecol. Manag. 2010. V. 259. Iss. 10. P. 1922–1929.

## THE SPECIFICS OF GROWTH AND PRODUCTIVITY OF YOUNG PINE STANDS, FORMED OF THE TREES OF THE DIFFERENT CENOTIC POSITION

**R. S. Sobachkin, D. S. Sobachkin, A. E. Petrenko**

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

E-mail: romans@ksc.krasn.ru, dens@ksc.krasn.ru, alcorsci@bk.ru

The results of the formation of overstocked 15-year pine stands (with initial density of trees 35.6 thousand per ha) in the Krasnoyarsk forest-steppe the thinning aimed at reducing their density with keeping only the trees of a certain cenotic position (dominant, co-dominant and suppressed) in order to obtain information about the possible equalization of their forest inventory indicators in the process of their growth are presented. It was found that after thinning the dominant trees stand had density of 4.3 thousand per ha, had the best growth characteristics (mean height and mean diameter) and upheld that tendency through the whole observation period. After 7 years mean diameter of dominant trees increased from  $4.8 \pm 0.1$  to  $9.4 \pm 0.2$  cm, mean height increased from  $4.8 \pm 0.1$  to  $8.1 \pm 0.1$  m. Stem timber volume increased 5.0 times to the value of 141.63 m<sup>3</sup> per ha, relative density – from 0.51 to 1.27. Stand density for co-dominant trees decreased to 6.6 thousand per ha after the thinning. The mean diameter of co-dominant trees increased 2.6 times and amounted  $6.1 \pm 0.1$  cm, the mean height increased from  $3.4 \pm 0.1$  to  $5.7 \pm 0.1$  m. Stem timber volume increased from 7.92 to 60.06 m<sup>3</sup>/ha, relative density increased 3.7 times (1.00). After the thinning the suppressed trees underwent a long (1–2 years) adaptation period, had disproportional growth in height and decreased growth in diameter (relative height 244). Stand density for suppressed trees pine *Pinus sylvestris* L. decreased to 6.3 thousand per ha after the thinning. The mean diameter of the suppressed trees after 7 years after the thinning changed from  $0.9 \pm 0.1$  to  $4.2 \pm 0.1$  cm, the mean height – from  $2.3 \pm 0.1$  to  $3.8 \pm 0.1$  m. Timber volume increased from 1.09 to 17.23 m<sup>3</sup> per ha, relative density increased from 0.07 to 0.69.

**Keywords:** Scots pine, young stands, thinning, density, dominant trees, wood increment

**How to cite:** Sobachkin R. S., Sobachkin D. S., Petrenko A. E. The specifics of growth and productivity of young pine stands, formed of the trees of the different cenotic position // *Sibirskij Lesnoj Zhurnal* (Sib. J. For. Sci.). 2022. N. 3. P. 34–39 (in Russian with English abstract).

УДК 630\*182:630\*181.65:630\*221.04

## ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РОСТА СОСНОВЫХ ДРЕВОСТОЕВ

А. Н. Борисов, В. В. Иванов

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

E-mail: alnik\_borisov@mail.ru, viktor-forest1954@yandex.ru

*Поступила в редакцию 08.02.2022 г.*

Предложена имитационная модель роста сосновых древостоев, позволяющая в условиях конкуренции за доступный ресурс рассчитать прирост по диаметру ствола для каждого дерева на моделируемом участке, а также производные таксационные показатели: густоту, полноту, запас стволовой древесины, и отследить динамику всех этих показателей с шагом в один год с учетом взаимного расположения деревьев в древостое, их размеров и количество доступного ресурса для каждого дерева. Верификация модели выполнена с использованием материалов многолетних исследований на постоянных пробных площадях, заложенных в молодняках, средневозрастных и спелых древостоях. Рассмотрено несколько сценариев роста сосновых древостоев, изучено влияние рубок на средний диаметр ствола и прирост по диаметру; средний годовой прирост; густоту древостоя; запас стволовой древесины. Предложенная имитационная модель является эффективным инструментом изучения роста древостоев и служит альтернативой трудоемким натурным исследованиям, которые затруднительно реализовать на длительных временных интервалах. Моделирование позволяет изучить влияние рубок в лесах различного целевого назначения. Путем варьирования интенсивности и периодичности рубок при моделировании на основе анализа динамики основных таксационных показателей можно выбрать систему мероприятий по уходу за лесами, обеспечивающую наиболее полную реализацию задач по интенсивному лесовыращиванию.

**Ключевые слова:** *сосняки, конкуренция, рубки ухода, доступный ресурс, область доминирования.*

DOI: 10.15372/SJFS20220305

### ВВЕДЕНИЕ

В повышении устойчивости и продуктивности сосновых насаждений важная роль принадлежит рубкам ухода за лесом, основная задача которых состоит в обеспечении более эффективного использования лесовосстановительного, продукционного и ресурсно-экологического потенциала лесных экосистем. Они направлены на формирование хозяйственно-ценных насаждений от момента смыкания молодняков до возраста спелости. По мнению А. А. Онучина (Ученые..., 2022), рубки ухода могут дать гораздо больший прирост на участке леса, чем посадка нового леса, и при должном уходе возможно получение дополнительного прироста в объеме до 14 м<sup>3</sup>/(га · год). Систематические рубки ухода в высокополнотных одновозрастных сосновых древостоях увеличивают до 50 % хозяйственный

эффект за счет использования потенциального отпада (Бузыкин и др., 2002).

Понимание влияния густоты и разреживания на процесс роста деревьев в условиях конкуренции за ресурсы является важной задачей. В ряде работ высказывается предположение, что существуют оптимальные густота и полнота древостоя. Считается, что максимальный прирост достигается при полноте ниже 1.0 (Assmann, 1961; Поляков, 1973; Антанайтис и др., 1986; Кузьмичев, 2013). Регулировать продуктивность насаждений можно выборочными и постепенными рубками. Это также позволяет сократить оборот рубки и получить значительные лесоводственный и хозяйственный эффекты. Критерий оптимизации структуры древостоев определяется прежде всего его целевым назначением. Рубки ухода в лесах эксплуатационного назначения, как считает З. Я. Нагимов (2000), должны к воз-

расту спелости сформировать древостой с такими полнотой и запасом, которые приближаются по параметрам к нормальному древостою.

Выявление закономерностей роста деревьев – неперенный этап решения задачи обеспечения оптимальных условий роста с использованием системы лесохозяйственных мероприятий. Методы анализа данных в этих исследованиях имеют широкий спектр и часто включают моделирование динамики роста древостоев (Разин, 1981; Антанайтис и др., 1986; Grabarnik, Sarkka, 2009; O'Rourke, Kelly, 2015). Такие модели предназначены, прежде всего, для выявления закономерностей роста по высоте, запасу и диаметру ствола с учетом возраста древостоев и их густоты. Процессы роста напрямую зависят от количества доступного ресурса и от того, как этот ресурс будет распределяться между конкурирующими особями. Многие исследователи в качестве оценки доступного ресурса используют площадь роста дерева. Существует значительный набор методов ее расчета (Поляков, 1973; Нагимов, 2000; Вайс, 2005; Чернов и др., 2012).

Цель работы – выявить закономерности роста сосновых древостоев методом имитационного моделирования различных сценариев лесоводственного ухода.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Объектом исследований служили молодняки, средневозрастные и спелые, чистые по составу сосновые одновозрастные насаждения

Красноярской островной лесостепи. С учетом теоретических положений таксации (ОСТ..., 1983) в одновозрастных сосновых насаждениях I–II класса бонитета были заложены постоянные пробные площади (пп), на которых проводились рубки и выполнялись периодические обследования (Онучин и др., 2011; Иванов и др., 2017). Основные таксационные характеристики пробных площадей приведены в таблице.

В молодняках естественного происхождения были заложены пп размером 20 × 20 м, на которых провели рубки ухода с интенсивностью по числу стволов от 93 до 57 % и выполнен сплошной пересчет с измерением высот деревьев и диаметров стволов у шейки корня. На каждой пп отбирали по 5 модельных деревьев.

В средневозрастном сосняке зеленомошном I класса бонитета были заложены три пп размером 0.15 га, находящиеся в одном таксационном выделе, и отделенные друг от друга буферной зоной.

Спелые сосновые древостои в возрасте 105–110 лет на пп представлены сосняками разно-травно-зеленомошной группы типов леса. Пробные площади закладывались в пределах одного таксационного выдела на участках с разной интенсивностью выборочной рубки по запасу. На пп проводились сплошной пересчет, нумерация деревьев и их картирование.

Текущий периодический прирост изучался по запасу (в м<sup>3</sup>/га), который определялся по диаметру – сумме площади поперечных сечений, по высоте, а также по соотношениям этих показателей – видовым числам (Науменко, 1948; Дворецкий, 1964; Лиела и др., 1977; Антанайтис,

Основные таксационные показатели древостоев на пробных площадях

Номер пп*	Возраст, лет	Густота, шт./га	Средний диаметр, см	Средняя высота, м	Сумма площадей сечения, м <sup>2</sup> /га	Полнота	Запас, м <sup>3</sup> /га
1	13	2900	8.0	6.2	14.7	–	51.6
2	13	9450	5.4	5.4	21.7	–	73.4
3	13	16830	4.2	5.6	22.9	–	83.2
4к	13	34200	3.3	5.5	28.9	–	109.3
5	47	2420	15.8	19.0	47.4	1.4	415
6	47	2073	17.1	19.6	50.5	1.5	456
7	47	2367	16.2	19.2	49.0	1.4	431
8к	47	2640	15.4	18.4	48.9	1.3	433
9	120	528	32.2	28.4	42.9	1.2	462
10	110	301	32.7	25.2	25.3	0.7	261
11	110	226	32.8	23.1	19.2	0.5	198
12к	120	384	38.8	25.5	45.4	1.0	523

\* Пробные площади с номером, имеющим индекс «к», являются контролем.

1986). Кроме того, для средневозрастных и спелых насаждений методами дендрохронологии анализировались керны, взятые не менее чем у 15 деревьев с пп и представленные всеми ступенями толщины. Дополнительно на пп 6 выполнен массовый отбор кернов, охвативший 81 % от общего количества деревьев исследуемого участка.

Данные по проективному покрытию крон анализировались по материалам крупномасштабной съемки, сделанной с помощью квадрокоптера DJI Phantom 3 Pro, с использованием методов ГИС-технологий в программе ArcMap.

Анализ различных сценариев рубок и изучение их влияния на рост сосновых древостоев выполнены методом имитационного моделирования с использованием оригинальной программы, реализованной на языке Object Pascal в Delphi.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Влияние воздействия рубок на рост деревьев и продуктивность древостоев исследовались с помощью метода имитационного моделирования. С этой целью использовалась модель роста деревьев, которая рассчитывала характеристики деревьев на исследуемых участках с периодичностью в один год. Имитационная модель роста основана на учете конкуренции за доступный ресурс. Для описания роста дерева по диаметру ствола использовалось следующее балансное уравнение:

$$\Delta D = k_1 [P^\alpha - k_2 (D / D_{\max})^\beta], \quad (1)$$

где  $P$  – доступный для дерева ресурс;  $D$  – текущий диаметр ствола на высоте 1.3 м;  $D_{\max}$  – максимальный диаметр ствола для данных условий произрастания;  $k_1$  и  $k_2$  – коэффициенты;  $\alpha$  и  $\beta$  – параметры.

Обычно оценку доступного ресурса дают по площади роста. Среди использующих полигоны роста наиболее распространен метод Ф. К. Stöhr (1963). Полигоны в нем формируются с учетом диаметров стволов ближайших соседей таким образом, чтобы граница между этими соседями проходила дальше от более крупного дерева и ближе к тонкому пропорционально диаметрам их стволов. Следует отметить, что у этого метода и аналогичных ему есть ряд недостатков. Во-первых, на полигоны разбивается вся территория, когда даже прогалины могут быть отнесены к площади роста дерева. Во-вторых, при разделении зон влияния между деревьями, раз-

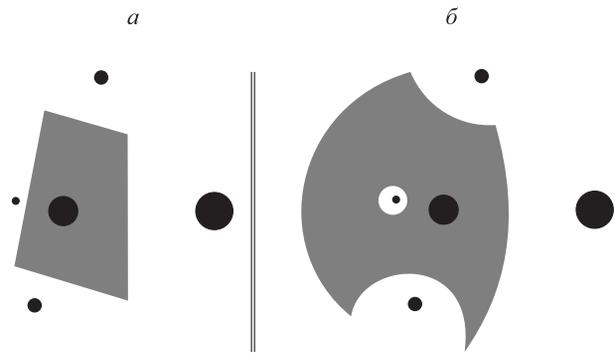


Рис. 1. Площадь роста по методу Ф. К. Stöhr (1963) (а) и область доминирования (б).

личающимися по диаметрам стволов, меньшее дерево с экологической точки зрения отчуждает от большего непропорционально большой фрагмент площади роста. Это несоответствие проявляется тем очевиднее, чем больше разница диаметров стволов конкурентов.

В настоящей работе в качестве оценки количества доступного ресурса используется площадь области доминирования ( $S_{\text{ОД}}$ ) (Борисов и др., 2019). Метод областей доминирования свободен от указанных выше недостатков. В области доминирования (ОД) особь оказывает доминирующее влияние в освоении ресурса. При этом предполагается, что оно прямо пропорционально размеру особи и обратно пропорционально квадрату расстояния от нее. Графический пример, иллюстрирующий различия в формировании областей влияния для ближайших соседей разного диаметра ствола, приведен на рис. 1.

Размеры кругов на рисунке пропорциональны диаметрам стволов на высоте 1.3 м ( $d_{1.3}$ ).

В одновозрастных сосновых насаждениях проанализированы данные, полученные на пп. Проведенный анализ показал наличие тесной связи между диаметрами стволов, а также приростом по диаметру с размером  $S_{\text{ОД}}$ . Для изучения зависимости  $d_{1.3}$  от  $S_{\text{ОД}}$  использовались данные по насаждениям в возрасте 37 лет (пп 5–7). Такой выбор обусловлен тем, что диаметр ствола отражает кумулятивный эффект роста дерева в зависимости от доступного для его роста ресурса, который практически не менялся до 37-летнего возраста, поскольку на этих пп не проводилось рубок. С помощью регрессионного анализа выявлена следующая зависимость диаметра ствола от  $S_{\text{ОД}}$ :

$$d_{1.3} = 5.63 + 1.94 \times S_{\text{ОД}}; R^2 = 0.79. \quad (2)$$

Реакция деревьев на рубку изучалась по динамике годичного радиального прироста ство-



Рис. 2. Радиальный прирост на контрольном участке (1) и участке, пройденном рубкой (2).

лов. Для этого использовались данные пп 5–7, на которых проводились рубки в 37- и 47-летнем возрасте с интенсивностью рубки по запасу 15 и 29 % соответственно. В спелых насаждениях на пп 9 интенсивность рубки, проведенной в возрасте 105 лет, составила 20 %, на пп 10 для деревьев в возрасте 110 лет – 35 %, а на пп 11 в возрасте 110 лет – 50 %.

На рис. 2 приведены данные по радиальному приросту: для модельного дерева в отсутствие экзогенных воздействий (контроль) и для дерева на пп 6, у которого в результате рубки  $S_{\text{од}}$  увеличилась на  $1.5 \text{ м}^2$ . В течении нескольких лет после рубки, начиная со следующего года, происходит увеличение прироста по диаметру. При изучении прироста по диаметру выявлено, что он зависит от увеличения площади области доминирования ( $dS$ ) после рубки. При значении  $dS > 1.5 \text{ м}^2$  радиальный прирост увеличился с 0.9 до 1.7 мм/год, при  $1.5 > dS > 0.5 \text{ м}^2$  – с 0.7 до 1.3 мм/год, а для  $dS < 0.5 \text{ м}^2$  – с 0.6 до 0.9 мм/год.

Количество ресурса, доступного для каждого дерева в древостое, влияет не только на рост по диаметру ствола, но и на все другие компоненты дерева. Это хорошо заметно на примере крон (О'Нара, 1988). В насаждениях с высокой плотностью хорошо проявляется дифференциация по степени развитости крон, ее протяженности и степени охвоения. Даже в одновозрастном древостое можно встретить деревья всех классов по Крафту. Эндогенные и экзогенные факторы оказывают влияние не только на диаметр ствола и его прирост, но и на формирование крон, поэтому ожидаемо, что рубки ухода приводят к изменениям в форме крон и площади их проекции вследствие увеличения доступного ресур-

са и улучшения условий роста (Borisov, Ivanov, 2019).

Для изучения влияния количества доступного ресурса на формирование крон использовались съемка, сделанная с помощью беспилотного летательного аппарата (БПЛА), и данные картирования пп. Площади проекций крон  $S_{\text{кр}}$  и сомкнутость полога определялись методом GIS-технологий с использованием программы ArcMap. На рис. 3 приведен фрагмент исследуемого участка, на котором показано размещение деревьев, расположение крон относительно положения стволов и границы ОД. Диаметры кругов пропорциональны значениям  $d_{1,3}$ .

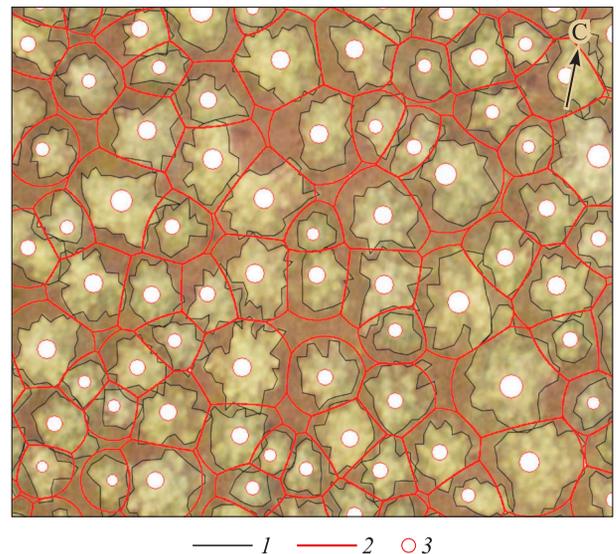


Рис. 3. Фрагмент пп 6 средневозрастного соснового древостоя.

1 – контуры крон; 2 – границы областей доминирования; 3 – положение стволов деревьев.

Проведенный регрессионный анализ позволил получить уравнение, описывающее связь между  $S_{кр}$  и  $S_{од}$ :

$$S_{кр} = 0.655 + 0.345 \times S_{од}; R = 0.84.$$

Исследования показали, что в условиях конкуренции за доступный ресурс  $S_{од}$  тесно связана с темпами роста дерева, и её использование в качестве оценки доступного ресурса  $P$  в уравнении 1 обосновано. Непосредственно сама имитационная модель реализована на языке Object Pascal в Delphi. В рамках этой программы производится генерация участка древостоя с заданными параметрами, соответствующими характеристикам изучаемого объекта. Поскольку деревья на участке имеют различия в темпах роста, происходит отпад, проводятся рубки и ОД деревьев меняются, то перерасчет значений диаметров стволов и соответствующей этим деревьям  $S_{од}$  проводились с интервалом в один год. Прирост по диаметру вычислялся в соответствии с уравнением 1. Методика и алгоритмы вычисления значений  $S_{од}$  и площади свободного роста ( $S_f$ ), необходимых для моделирования, описаны в работе А. Н. Борисова и соавт. (2019). На каждом шаге моделирования данные по характеристикам каждого дерева, включая значения  $S_{од}$ , заносились в базу данных, используя которую аналитический блок программы позволяет провести статистический анализ по любому временному диапазону. Графический блок программы предназначен для визуализации данных по динамике тех или иных характеристик, а также позволяет выводить в графическом виде схему размещения деревьев на участке и соответствующие им границы ОД.

При имитационном моделировании роста верификация модели осуществлялась на основе данных, полученных на пробных площадях. Размер моделируемого участка составлял  $40 \times 40$  м на местности. В процессе моделирования генерировались исходные реализации со случайным размещением деревьев, густота при этом соответствовала густоте на пп в заданном возрасте, а распределение стволов по ступеням толщины соответствовало характеристикам пп. Параметры модели подбирались такие, чтобы рост особей и отпад проходили так же, как и на пп. Методом имитационного моделирования путем варьирования выбирались значения параметров, при которых прирост в модели соответствовал данным натурных исследований на пп. Значение масштабного коэффициента  $k_1$  бралось таким,

чтобы совпадал среднегодовой прирост деревьев в модели и на пп.

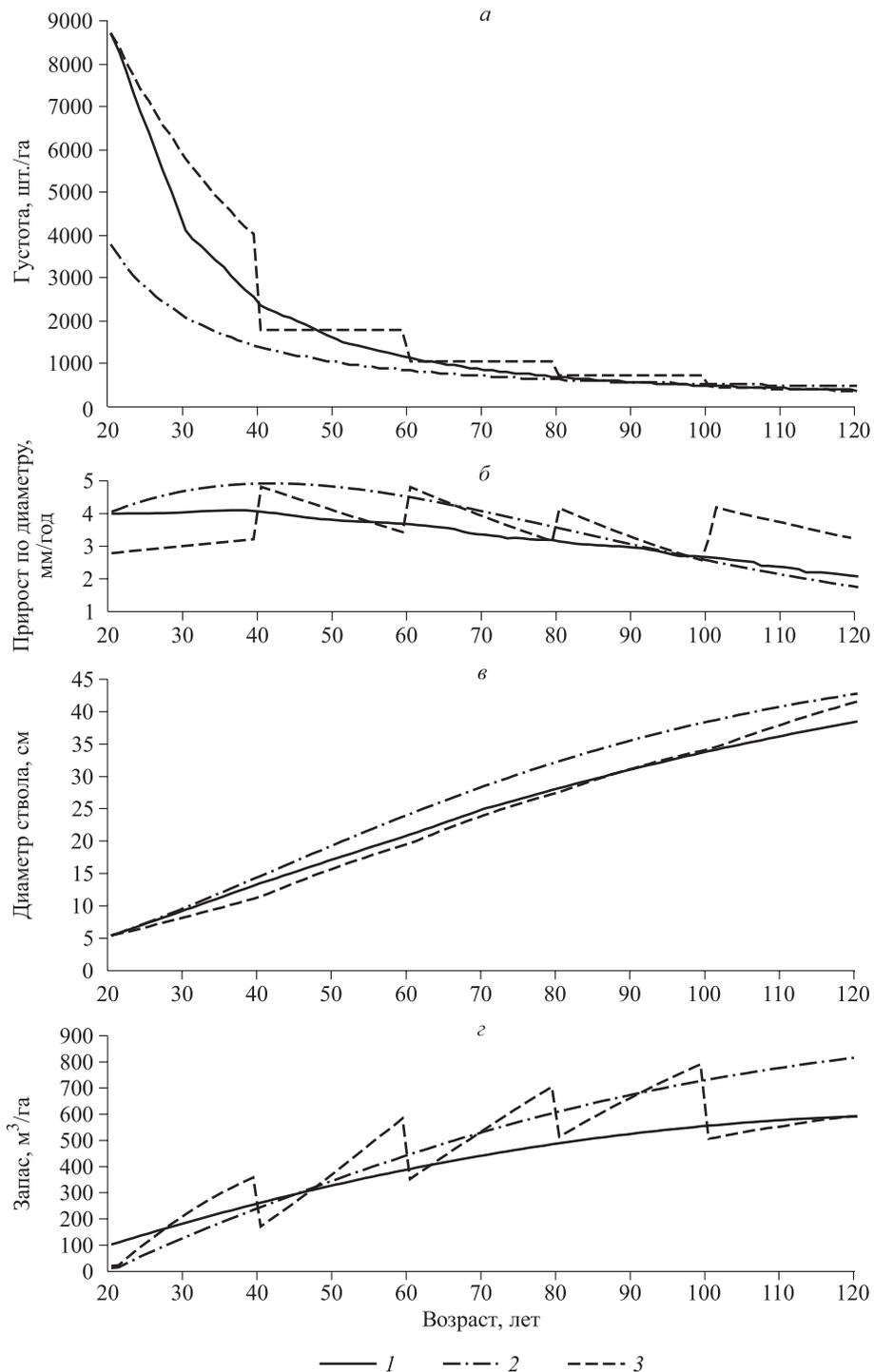
Для чистых по составу сосновых насаждений с использованием предложенной модели получена динамика густоты насаждения, годовичного прироста по диаметру ствола, диаметра ствола на высоте 1.3 м и запаса стволовой древесины. Для сравнения использованы данные для полных древостоев в этих же условиях местообитания (Швиденко и др., 2008).

На рис. 4 данные для нормального древостоя представлены кривыми 1.

Кривые 2 показывают динамику указанных показателей, полученных при моделировании в случае, когда  $S_{од}$  в процессе роста составляет 30 % от  $S_f$  дерева. Показано (Борисов и др., 2019), что в этом случае деревья эффективно используют доступный ресурс, имеют хорошо развитую крону и устойчивый рост по диаметру и объему ствола. Такие значения  $S_{од}$  обеспечивают компромисс между увеличением прироста по объему ствола за счет доступного ресурса и ростом запаса древостоя за счет большей густоты. Кривые 3 относятся к сценарию системы рубок ухода за лесом, когда с возраста 40 лет густота древостоя через каждые 20 лет снижается до значений, обеспечивающих  $S_{од}$  в размере 30 % от  $S_f$ .

Рассматривая данные, приводимые в таблицах хода роста нормальных древостоев, следует отметить, что древостой может соответствовать показателям, приведенным в этих таблицах, только в некоторый период своего роста. В. В. Кузьмичев (2013) отмечал, что: «древостой с равной на определенном этапе роста полнотой по площади сечения, но с разной историей развития, могут в дальнейшем показать несравнимый ход роста». Таким образом, ход роста нормального древостоя рассматривается здесь как пример некоторого абстрактного древостоя, и используется для сравнения с ним динамики роста модельных рядов. В этом же ключе рассматривается модельный вариант 2 (рис. 4, а), в котором подразумевается, что постоянно поддерживается густота, обеспечивающая  $S_{од}$  в размере 30 % от  $S_f$  дерева.

При сравнении динамики варианта 2, видим, что в возрасте 20 лет густота хотя и ниже в 2.3 раза, чем в нормальном древостое, но в 40 лет, при меньшей густоте в модели, их запасы практически сравнялись. Это объясняется тем, что в период от 20 до 40 лет очень велика конкуренция, и при более высокой густоте это приводит к существенному ослаблению в целом деревьях небольшого диаметра и крупных особей, и,



**Рис. 4.** Модель роста деревьев при различных сценариях регулирования густоты древостоев.

как следствие, снижению прироста по диаметру. Прирост по диаметру в модели превышал таковой для нормального древостоя (рис. 4, б) в течение всего периода от 20-летнего возраста до 90 лет. Далее в этом сценарии запас древостоя по модели постоянно увеличивается вплоть до 817 м<sup>3</sup>/га в возрасте 120 лет против 596 для нормального древостоя.

Сценарий варианта 3 предусматривает проведение рубок каждые 20 лет, начиная с 40-летнего возраста. Интенсивность разреживания древостоя делается такой, чтобы после рубки в результате перераспределения доступного ресурса между оставшимися деревьями обеспечивалась  $S_{Од}$  в размере 30 % от  $S_{Г}$ . После каждой рубки прирост по диаметру увеличивался на

1–2 мм/год, снижаясь к моменту следующей рубки до уровня прироста в нормальном древостое. Интенсивность рубок составляла от 27 до 49 % по запасу, что в абсолютных значениях давало от 169 до 288 м<sup>3</sup>/га. При этом к возрасту 120 лет запас ствольной древесины в вариантах 1 и 3 практически совпадал (рис. 4, з). Следует отметить, что средний диаметр ствола в 120 лет составлял для нормального древостоя 38.5 см, а для модели (вариант 3) – 42.8 см.

Меняя в сценариях рубок их периодичность и интенсивность на разных этапах роста деревьев, можно подобрать систему рубок ухода за лесом, обеспечивающую к возрасту спелости не только заданные характеристики древостоя, но и наиболее эффективное использование доступных ресурсов на протяжении всего периода роста.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование системы лесохозяйственных мероприятий позволяет существенно влиять на формирование древостоев на различных этапах его развития. Регулирование густоты древостоя снижает конкурентные отношения до уровня, при котором не происходит замедление темпов роста деревьев. Хотя при повышенной густоте продуктивность древостоя может быть высокой, но этому сопутствует пониженная производительность составляющих насаждение особей. В случае необходимости получения деловой древесины крупных размеров густоту древостоя следует снижать, увеличивая уровень доступного ресурса. В лесах водоохранного назначения, рекреационных и др. возникают аналогичные проблемы, требующие поиска компромиссного решения. Изучение влияния рубок, их интенсивности и периодичности на рост древостоев на основе натурных исследований связано с большой трудоемкостью этих работ и необходимостью проведения исследований на больших временных интервалах.

При решении таких задач незаменимым инструментом являются методы моделирования. Предложенная имитационная модель роста деревьев использует площадь области доминирования в качестве оценки ресурса, необходимого для этого. Анализ данных, полученных на постоянных пробных площадях, заложенных в одновозрастных сосновых молодняках, средневозрастных и спелых древостоях, показал тесную связь размеров крон и прироста по диаметру ствола деревьев с площадью области доминирования. Это свидетельствует о том, что

площадь области доминирования может обоснованно применяться как оценка доступного для дерева ресурса. Для верификации модели использовались данные многолетних наблюдений на постоянных пробных площадях. Имитационное моделирование для одновозрастных сосновых насаждений позволило с возраста от 20 до 120 лет с интервалом в один год проследить динамику густоты древостоя, диаметра стволов и ежегодного прироста, а также запаса ствольной древесины. Не менее сырьевых важны экологические функции леса (депонирование углерода, водоохранные, почвозащитные и др.). В связи с этим критерий оптимальности при выборе хозяйственных мероприятий будет зависеть от целевого назначения леса. Имитационное моделирование позволяет рассмотреть различные сценарии рубок, различающиеся как их интенсивностью на разных этапах формирования древостоя, так и периодичностью проведения этих мероприятий. Такой подход позволяет для любой категории лесов выбрать систему лесоводственного ухода, обеспечивающую наиболее полную реализацию задач по интенсивному лесовыращиванию.

*Исследование выполнено в рамках проекта «Развитие научно-образовательного Центра мониторинга климатически активных веществ (Углерод в экосистемах: мониторинг) в рамках Федеральной научно-технической программы в области экологического развития Российской Федерации и климатических изменений на 2021–2030 годы».*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Антанайтис В. В., Тябера А. П., Шляптеня Я. А. Законы, закономерности роста и строения древостоев. Каунас: Литов. с.-х. акад., 1986. 157 с.
- Борисов А. Н., Иванов В. В., Петренко А. Е. Формирование пространственной структуры сосновых древостоев при рубках ухода // Лесоведение. 2019. № 1. С. 1–12.
- Бузыкин А. И., Пиеничникова Л. С., Суховольский В. Г. Густота и продуктивность древесных ценозов. Новосибирск: Наука. Сиб. отд.-ние, 2002. 152 с.
- Вайс А. А. Оптимизация горизонтальной структуры смешанных разновозрастных пихтовых древостоев // Лесн. таксация и лесоустройство. 2005. № 2. С. 17–21.
- Дворецкий М. Л. Текущий прирост древесины ствола и древостоя. М.: Лесн. пром-сть, 1964. 126 с.
- Иванов В. В., Борисов А. Н., Петренко А. Е., Семякин Д. А., Собачкин Д. С., Собачкин Р. С. Густота сосновых древостоев при интенсивном лесовыращивании // Сиб. лесн. журн. 2017. № 6. С. 102–109.
- Кузьмичев В. В. Закономерности динамики древостоев. Новосибирск: Наука, 2013. 207 с.

- Лиена И. Я., Мауринь А. М., Рамане К. К. Оценка реакции древостоя как основного критерия антропогенного воздействия // Антропогенность наземных биоценозов и прикладная экология. Таллин, 1977. С. 114–166.
- Нагимов З. Я. Закономерности роста и формирования надземной фитомассы сосновых древостоев: автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук: 06.03.03. Екатеринбург: УГЛТУ, 2000. 40 с.
- Науменко И. М. Текущий объемный прирост насаждений // Науч. зап. Воронеж. лесохоз. ин-та. Воронеж: Воронеж. обл. кн. изд-во, 1948. Т. 9. С. 121–148.
- Онуцин А. А., Маркова И. И., Павлов И. Н. Влияние рубок ухода на радиальный прирост стволов и формирование сосновых молодняков // Хвойные бореал. зоны. 2011. № 2–3. С. 258–267.
- ОСТ 56-69-83. Площади пробные лесоустroительные. Метод закладки. М.: ЦБНТИ Гослесхоза СССР, 1984. 60 с.
- Поляков А. К. Определение оптимальной густоты сосны в свежей субори // Лесн. хоз-во. 1973. № 12. С. 14–18.
- Разин Г. С. Способ определения оптимальной текущей густоты древостоев при их целевом выращивании // ИВУЗ. Лесн. журн. 1981. № 3. С. 45–48.
- Ученые: актуальное положение дел в лесном секторе экономики России требует изменений в лесной политике. 26 января 2022 г. Красноярск: Ин-т леса им. В. Н. Сукачева СО РАН, 2022.
- Чернов Н. Н., Соловьев В. М., Нагимов З. Я. Методические основы лесокультурных исследований. Екатеринбург: УГЛТУ, 2012. 421 с.
- Швиденко А. З., Щепаченко Д. Г., Нильсон С., Булуй Ю. И. Таблицы и модели хода роста и продуктивности насаждений основных лесобразующих пород Северной Евразии (нормативно-справочные материалы). Изд. 2-е, доп. М.: Междунар. ин-т приклад. систем. анализа, 2008. 886 с.
- Assmann E. Waldertragskunde. Organische Produktion, Struktur, Zuwachs und Ertrag von Waldbestaenden. BLV Verlagsgesellschaft, Muenchen; Bonn; Wien, 1961. 490 p.
- Borisov A. N., Ivanov V. V. *Pinus sylvestris* L. growth depending on available resources in ecological niche // Environ. Analys. & Ecol. Stud. 2019. V. 5. Iss. 5. P. 71–73.
- Grabarnik P., Sarkka A. Modelling the spatial structure of forest stands by multivariate point processes with hierarchical interactions // Ecol. Model. 2009. V. 220. Iss. 9. P. 1232–1240.
- O'Hara K. L. Stand structure and growing space efficiency following thinning in an even-aged Douglas-fir stand // Can. J. For. Res. 1988. V. 18. Iss. 7. P. 859–866.
- O'Rourke, Kelly G. E. Spatio-temporal modelling of forest growth spanning 50 years – the effects of different thinning strategies // Proc. Environ. Sci. 2015. V. 26. P. 101–104.
- Stöhr F. K. Erweiterungsmöglichkeit der Winkelzahlprobe: Diss. Freiburg, 1963. 125 p.

## SIMULATION MODELING OF THE GROWTH OF PINE STANDS

A. N. Borisov, V. V. Ivanov

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

E-mail: alnik\_borisov@mail.ru, viktor-forest1954@yandex.ru

A simulation model of the growth of pine stands is proposed. The model, taking into account the competition for the available resource, allows to calculate the increase in trunk diameter for each tree in the simulated area, as well as to derive the taxation characteristics: stand density, completeness, stock of stem wood and make monitoring the dynamics of all these indicators in increments of one year. The model takes into account the relative location of trees in the tree stand, their size and the amount of available resource for each tree. The verification of the model was carried out using the materials of long-term research on permanent research plots of young, middle-aged and ripe stands. Several scenarios for the growing of pine stands are considered. The influence of cutting on the dynamics of a number of taxation characteristics is studied. These are the average diameter the average diameter of the trunk and the increase in diameter, the value of the average annual increase; the density of the stand; the stock of stem wood. The proposed simulation model is an effective tool for studying the growing of stands and serves as an alternative to time-consuming field studies, which are difficult to implement over long time intervals. Modeling allows studying the impact of logging in forests for various destinations. It is possible to choose such a system of forest care activities using the analysis of the dynamics of the main taxation indicators, which provides the most complete implementation of the tasks of intensive reforestation by varying the intensity and frequency of cutting during modeling.

**Keywords:** *pine stands, competition, care logging, available resource, dominating area.*

**How to cite:** Borisov A. N., Ivanov V. V. Simulation modeling of the growth of pine stands // *Sibirskij Lesnoj Zhurnal* (Sib. J. For. Sci.). 2022. N. 3. P. 40–47 (in Russian with English abstract).

УДК 502/504:630\*53:54

## ПОСТРОЕНИЕ БОНИТЕТНОЙ ШКАЛЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОБОБЩЕННОГО АЛГЕБРАИЧЕСКОГО РАЗНОСТНОГО ПОДХОДА

**А. В. Лебедев, В. В. Кузьмичев**

*Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К. А. Тимирязева  
127550, Москва, ул. Тимирязевская, 49*

E-mail: avl1993@mail.ru

*Поступила в редакцию 19.08.2021 г.*

Основой прогноза роста древостоев являются бонитетные шкалы. Расширение знаний о процессах функционирования лесных экосистем, характере изменений морфолого-таксационных показателей деревьев и древостоев, их взаимосвязей и взаимообусловленностей и создание более пригодного для описания биологических процессов математического аппарата и соответствующего программного обеспечения формируют предпосылки для постановки и решения проблемы прогноза роста древостоев на более высоком методическом уровне. Цель работы – дать оценку прогностической способности уравнений роста, полученных с использованием обобщенного алгебраического разностного подхода (GADA), для описания хода роста древостоев по средней высоте и построения бонитетной шкалы. Данными для исследования послужили общие таблицы хода роста полных (нормальных) сосновых древостоев Северной Евразии. В общей сложности анализируются 25 уравнений, полученных с помощью подхода GADA. Сравнительный анализ показал, что наилучшее качество выравнивания данных обеспечивает уравнение, основанное на функции Митчерлиха (известной также как Дракина – Вуевского, Чапмана – Ричардса) с заменой параметров, отвечающих за предельные значения высоты и форму кривой. Данная модель полиморфна, имеет форму сигмовидной кривой и переменные асимптоты, т. е. учитывает большинство предъявляемых свойств к моделям хода роста по высоте. Ошибки модели зависят от временного интервала прогнозирования и уровня производительности древостоя. С увеличением срока прогнозирования происходит увеличение ошибки. Для всех интервалов дальности прогноза получено значение средней абсолютной ошибки, не превышающее 2.01 %. Наибольшей средней абсолютной ошибкой прогноза (1.1–2.2 %) характеризуются крайние классы бонитета ( $I^b$ ,  $V$ ,  $V^a$  и  $V^b$ ). Рассмотренная в исследовании методика может быть применена для разработки моделей хода роста таксационных показателей других лесообразующих пород России.

**Ключевые слова:** ход роста древостоев, средняя высота, динамические уравнения.

DOI: 10.15372/SJFS20220306

### ВВЕДЕНИЕ

Вследствие долговечности древесных пород лесоводы вынуждены составлять планы ведения хозяйства на долгосрочную перспективу, охватывающую период от возникновения древостоя до его спелости (возраста, когда он удовлетворяет цели ведения хозяйства и может быть включен в хозяйственное использование). Однако в последние десятилетия произошли существенные изменения, касающиеся принципиальных основ этого планирования. Пришло понимание плане-

тарной роли леса, многообразия выполняемых им защитных функций, в связи с чем лесосырьевая функция была признана второстепенной. Для лесов защитного назначения понятие хозяйственной спелости потеряло смысл, важным становится период достаточно полного выполнения древостоями защитных функций (Лебедев, 2019; Дубенок и др., 2020). Но при любых целях ведения хозяйства необходимым звеном планирования остается прогноз роста всего разнообразия древостоев, учтенных в процессе инвентаризации отдельных хозяйственных единиц.

Методы прогнозов роста древостоев постоянно совершенствовались, но в настоящее время наблюдаются их коренные изменения. В первую очередь это связано с необходимостью учитывать влияние на рост леса климатических изменений (особенно проявившихся в последние 50 лет), чего раньше не делали. Затем происходят хотя и медленные, но заметные изменения продуктивности местообитаний. Несколько расширились знания процессов функционирования лесных экосистем, характера изменений в ходе роста морфолого-таксационных показателей деревьев и древостоев, их взаимосвязей и взаимобусловленностей. Создаются более пригодный для описания биологических процессов математический аппарат и соответствующее программное обеспечение, возникают предпосылки для постановки и решения проблемы прогноза роста древостоев на более высоком методическом уровне.

Основой прогноза роста древостоев на протяжении более 100 лет остаются бонитетные шкалы, отражающие жесткий характер изменений средних высот древостоев с увеличением возраста. Их недостатки отмечаются на протяжении многих лет (Кузьмичев, 1977, 2013; Хлюстов, Лебедев, 2017), но пути совершенствования этого подхода (или его изменения) не вполне очевидны. Наиболее приемлемым считается анализ хода роста в высоту нескольких наиболее крупных деревьев (в возрасте замедления прироста) для разных местообитаний, усреднение их линий роста по каждому местообитанию и построение согласованной шкалы верхних высот (новой шкалы бонитетов). Эти деревья восприняли все климатические и эдафические изменения условий роста, но будущие изменения они отразить, разумеется, не могут. Через несколько десятилетий потребуются повторение подобной процедуры и сравнение результатов для определения темпов изменения условий роста. Второй путь заключается в сопоставлении средних высот древостоев в разных местообитаниях, полученных на постоянных пробных площадях. Но малое количество таких наблюдений ограничивает возможности использования этого варианта.

Цель работы – дать оценку прогностической способности моделей роста, инвариантных относительно базового возраста, полученных с использованием обобщенного алгебраического разностного подхода для описания хода роста древостоев по средней высоте и построения бонитетной шкалы.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Данными для исследования послужили общие таблицы хода роста (ТХР) полных (нормальных) сосновых древостоев (Швиденко и др., 2008). Значения средних высот представлены в диапазоне возрастов от 10 до 200 лет и классов бонитета от I<sup>b</sup> до V<sup>b</sup>. Для анализа отобранные данные были случайным образом разделены в соотношении 7 : 3 на обучающую выборку, которая использовалась для подгонки модели, и тестовую для проверки обобщающей способности.

В исследовании используется обобщенный алгебраический разностный подход (GADA) для моделирования связи средней высоты с возрастом древостоя. Метод GADA позволяет варьировать несколько параметров базовой функции роста и получать полиморфные кривые, специфичные для каждого уровня производительности древостоя. Это происходит при выполнении условия, что с помощью некоторого алгебраического преобразования все варьируемые параметры могут быть выражены как функция фиксированных или глобальных параметров и только одного изменяющегося параметра (Cieszewski, 2003). Метод предполагает выполнение следующих шагов (Cieszewski et al., 2007):

- 1) выбор базовой функции роста для моделирования изучаемой переменной (в данном случае средняя высота  $H$ );
- 2) принятие решения, какие параметры базового уравнения будут соотноситься с переменной меры производительности древостоя ( $X$ ), и выражение этой связи математическим уравнением;
- 3) решение уравнения для  $X$ ;
- 4) получение динамической трехмерной модели «производительность – возраст – средняя высота» в форме  $H = f(t, t_0, H_0)$  путем подстановки решения  $X$  в уравнение  $H = f(t, X)$  для начальных условий  $t_0$  и  $H_0$ .

В работе рассмотрены случаи как с одним параметром базовой модели, связанным с  $X$ , так и с двумя. Когда только один параметр связан с  $X$ , то GADA является эквивалентным методу алгебраического разностного подхода (ADA), который в числе первых был использован для получения уравнений, описывающих динамику роста (Bailey, Clutter, 1974). Метод ADA успешно использовался в моделировании динамики древостоев (Tomé, 1989; Elfving, Kiviste, 1997; Amaro et al., 1998).

В общей сложности проанализированы 25 уравнений, полученных с помощью подхода GADA (Cieszewski, Bailey, 2000) (табл. 1).

**Таблица 1.** Уравнения роста древостоев по высоте

Id	Преобразование параметров	Решение для $X$ с начальными значениями ( $y_0, t_0$ )	Динамическое уравнение
1	2	3	4
Richards (1959) $y = a(1 - \exp(-bt))^c$			
R1	$a = X$	$X_0 = \frac{y_0}{(1 - \exp(-bt_0))^c}$	$y = y_0 \left( \frac{1 - \exp(-bt)}{1 - \exp(-bt_0)} \right)^c$
R2	$b = X$	$X_0 = \frac{-\ln \left( 1 - \left( \frac{y_0}{a} \right)^{\frac{1}{c}} \right)}{t_0}$	$y = a \left( 1 - \left( 1 - \left( \frac{y_0}{a} \right)^{\frac{1}{c}} \right)^{\frac{t}{t_0}} \right)^c$
R3	$c = X$	$X_0 = \frac{\ln \left( \frac{y_0}{a} \right)}{\ln(1 - \exp(-bt_0))}$	$y = a \left( \frac{y_0}{a} \right)^{\frac{\ln(1 - \exp(-bt))}{\ln(1 - \exp(-bt_0))}}$
R4	$a = \exp(X),$ $c = c_1 + c_2 X$	$X_0 = \frac{\ln(y_0) - c_1 F_0}{1 + c_2 F_0},$ $F_0 = \ln(1 - \exp(-bt_0))$	$y = \exp(X_0)(1 - \exp(-bt))^{c_1 + c_2 X_0}$
R5	$a = \exp(X),$ $c = c_1 + \frac{c_2}{X}$	$X_0 = \frac{1}{2} \left( \ln(y_0) - c_1 F_0 + ((\ln(y_0) - c_1 F_0)^2 - 4c_2 F_0)^{\frac{1}{2}} \right),$ $F_0 = \ln(1 - \exp(-bt_0))$	$y = y_0 \left( \frac{1 - \exp(-bt)}{1 - \exp(-bt_0)} \right)^{c_1 + \frac{c_2}{X_0}}$
R6	$a = \exp(X),$ $c = c_1 + \frac{1}{X}$	$X_0 = \frac{1}{2} \left( \ln(y_0) - c_1 F_0 + ((c_1 F_0 - \ln(y_0))^2 - 4F_0)^{\frac{1}{2}} \right),$ $F_0 = \ln(1 - \exp(-bt_0))$	$y = \exp(X_0)(1 - \exp(-bt))^{c_1 + \frac{1}{X_0}}$
R7	$a = \exp(a_1 X),$ $c = c_1 + \frac{1}{X}$	$X_0 = \frac{\ln(y_0)}{a_1 + F_0},$ $F_0 = \ln(1 - \exp(-bt_0))$	$y = \exp(a_1 X_0)(1 - \exp(-bt))^{X_0}$
Lundqvist (1957) $y = a \exp(-bt^{-c})$			
L1	$a = X$	$X_0 = \frac{y_0}{\exp(-bt_0^{-c})}$	$y = y_0 \exp(b(t_0^{-c} - t^{-c}))$
L2	$b = X$	$X_0 = \frac{-\ln \left( \frac{y_0}{a} \right)}{t_0^{-c}}$	$y = a \left( \frac{h_0}{a} \right)^{\left( \frac{t_0}{t} \right)^c}$
L3	$a = \exp(X),$ $b = b_1 + \frac{1}{X}$	$X_0 = \frac{1}{2} t_0^{-c} \left( b_1 + t_0^{-c} \ln(y_0) + \sqrt{4t_0^{-c} + (-b_1 - t_0^{-c} \ln(y_0))^2} \right)$	$y = \exp(X_0) \exp \left( - \left( b_1 + \left( \frac{1}{X_0} \right) \right) t^{-c} \right)$
L4	$a = \exp(X),$ $b = b_1 + \frac{b_2}{X}$	$X_0 = \frac{1}{2} t_0^{-c} \left( b_1 + t_0^{-c} \ln(y_0) + \sqrt{4b_2 t_0^{-c} + (-b_1 - t_0^{-c} \ln(y_0))^2} \right)$	$y = \exp(X_0) \exp \left( - \left( b_1 + \left( \frac{b_2}{X_0} \right) \right) t^{-c} \right)$
L5	$a = \exp(a_1 X),$ $b = X$	$X_0 = \frac{\ln(y_0)}{a_1 - t_0^{-c}}$	$y = \exp(a_1 X_0) \exp(-X_0 t^{-c})$

Продолжение табл. 1

1	2	3	4
Hossfeld IV (Hossfeld, 1822) $y = \frac{t^2}{a + bt + ct^2}$			
H1	$a = X$	$X_0 = \left( \frac{t_0^2}{y_0} \right) - bt_0 - ct_0^2$	$y = y_0 \frac{t^2}{t_0^2 + y_0(b(t-t_0) + c(t^2 - t_0^2))}$
H2	$b = X$	$X_0 = \left( \frac{t_0}{y_0} \right) - \frac{a}{t_0} - ct_0$	$y = y_0 \frac{t}{t_0 + y_0(a(t^{-1} - t_0^{-1}) + c(t - t_0))}$
H3	$c = X$	$X_0 = \left( \frac{1}{y_0} \right) - at_0^{-2} - bt_0^{-1}$	$y = y_0 \frac{1}{1 + y_0(a(t^{-2} - t_0^{-2}) + b(t^{-1} - t_0^{-1}))}$
Hossfeld IV (Hossfeld, 1822) $y = \frac{bt^c}{t^c + a}$			
H4	$a = \frac{a_1}{X},$ $b = b_1 + X$	$X_0 = y_0 - a_1 + \left( (y_0 - a_1)^2 + \frac{2y_0 \exp(b_1)}{t_0^c} \right)^{\frac{1}{2}}$	$y = y_0 \frac{t^c (t_0^c X_0 + \exp(b_1))}{t_0^c (t^c X_0 + \exp(b_1))}$
Hossfeld IV (Hossfeld, 1822) $y = \frac{t^c}{b + at^c}$			
H5	$a = X,$ $b = b_1 X$	$X_0 = \frac{t_0^c}{b_1 + t_0^c}$	$y = \frac{t^c}{X_0 (b_1 + t^c)}$
Cieszewski (2003) $y^3 = \frac{bt^c}{t^{c-1} + a}$			
C1	$a = \frac{a_1}{2X},$ $b = b_1 + X$	$X_0 = \frac{1}{2} \left( y_0^3 t^{-1} - b_1 + ((y_0^3 t^{-1} - b_1)^2 + 2a_1 y_0^3 t^{-c})^{\frac{1}{2}} \right)$	$y = y_0 \left( \frac{t^c (t_0^{c-1} X_0 + a_1)}{t_0^c (t^{c-1} X_0 + a_1)} \right)^{\frac{1}{3}}$
Cieszewski и Bella (1989) $y = \frac{a}{1 + bt^{-c}}$			
C2	$a = a_1 + X,$ $b = b_1 X$	$X_0 = \frac{y_0 - a_1}{1 - b_1 y_0 t_0^{-c}}$	$y = \frac{a_1 + X_0}{1 + b_1 X_0 t^{-c}}$
C3	$a = a_1 + X,$ $b = \frac{b_1}{X}$	$X_0 = \frac{1}{2} \left( y_0 - a_1 + ((y_0 - a_1)^2 + 4b_1 y_0 t_0^{-c})^{\frac{1}{2}} \right)$	$y = \frac{a_1 + X_0}{1 + \frac{b_1}{X_0} t^{-c}}$
C4	$b = X$	$X_0 = \frac{a - y_0}{y_0 t_0^{-c}}$	$y = \frac{a}{1 - \left( 1 - \frac{a}{y_0} \right) \left( \frac{t_0}{t} \right)^c}$
Schumacher (1939) $\ln(y) = a + bt^c$			
S1	$a = X,$ $b = \frac{b_1}{X}$	$X_0 = \frac{1}{2} \left( \ln(y_0) + (\ln^2(y_0) - 4b_1 t_0^{-c})^{\frac{1}{2}} \right)$	$y = \exp \left( X_0 - \left( \frac{b_1}{X_0} \right) t^c \right)$

Окончание табл. 1

1	2	3	4
Weibull modified (Yang et al., 1978) $\ln(y) = a + b \ln(1 - \exp(1 - \exp(-t^c)))$			
W1	$a = X,$ $b = b_1 + b_2 X$	$X_0 = \frac{\ln(y_0) - b_1 \ln(1 - \exp(-t_0^{-c}))}{1 + b_2 \ln(1 - \exp(-t_0^{-c}))}$	$y = \exp(X_0 + (b_1 + b_2 X_0) \ln(1 - \exp(-t^c)))$
Gompertz modified (Jarosz and Klapéc, 2002) $y = a \exp(-b \exp(-ct)) + d$			
G1	$a = X,$ $d = -d_1 X - d_2$	$X_0 = \exp(-b \exp(-ct)),$ $X_1 = \exp(-b \exp(-ct_0))$	$y = \frac{X_0(d_2 + y_0) - d_1 y_0 - d_2 X_1}{X_1 - d_1}$
Korsuñ (1935) $y = a \exp(b \ln(t) + c \ln^2 t)$			
K1	$a = X$	$X_0 = \frac{y_0}{\exp(b \ln(t_0) + c \ln^2(t_0))}$	$X_0 = \frac{y_0 \exp(b \ln(t) + c \ln^2 t_0)}{\exp(b \ln(t_0) + c \ln^2(t_0))}$

Примечание.  $y$  – предсказанная по модели средняя высота в возрасте  $t$ ;  $y_0$  – начальное значение средней высоты в возрасте  $t_0$ ;  $X, F$  – вспомогательные переменные;  $a, b, c, d$  – параметры модели.

Для многих из них приводятся сравнительные оценки в литературных источниках (Nunes et al., 2011). Из рассматриваемых моделей четыре – анаморфные уравнения (R1, L1, H3 и H5), шесть – общие асимптотические полиморфные (R2, R3, L2, H1, H2 и C4) и остальные пятнадцать – полиморфные уравнения множественных асимптот.

Сравнение оценок для каждой из моделей основывалось на численном и графическом анализе остатков. Для каждого полученного уравнения рассчитывались следующие метрики, позволяющие судить о качестве модели:

– квадратный корень из среднеквадратической ошибки (RMSE)

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}}$$

– средний процент абсолютной ошибки (MAPE)

$$MAPE = 100 \times \sum \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right| / n,$$

– коэффициент детерминации ( $R^2$ )

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum (y_i - \bar{y}_i)^2},$$

– скорректированный коэффициент детерминации ( $R^2_{adj}$ )

$$R^2_{adj} = 1 - (1 - R^2) \frac{(n-1)}{(n-k)},$$

– информационный критерий Акаике (AIC)

$$AIC = 2k + n \ln \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{n},$$

– информационный критерий Байеса (BIC)

$$BIC = k \ln n + n \ln \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{n},$$

где  $k$  – количество параметров модели;  $n$  – число наблюдений;  $y_i$  – фактическое значение;  $\hat{y}_i$  – предсказанное по модели значение.

Считается, что применение коэффициента детерминации и скорректированного коэффициента детерминации в нелинейных моделях имеет ряд недостатков, но их использование в качестве некоторой глобальной меры адекватности преодолевает имеющиеся ограничения (Ryan, 1997; Castedo-Doradoa et al., 2007; Vargas-Larreta et al., 2013). Модель, для которой получены наибольшие значения коэффициентов детерминации и наименьшие значения информационных критериев, среднеквадратической ошибки и среднего процента абсолютной ошибки, признавалась в качестве лучшей. Кроме того, для полученных моделей проводился графический анализ кривых, так как их формы могут значительно различаться, даже несмотря на то что статистические данные о качестве моделей аналогичны (Neter et al., 1996). Анализ данных проводился с использованием Python 3.5 + NumPy 1.17.1 + SciPy 1.3.2 и R 3.6.3 + lme4 1.1.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Итоговые оценки качества моделей показаны в табл. 2.

Наилучшее качество показала полиморфная модель с множеством асимптот R4, основанная на функции Митчерлиха. Для нее на тестовой

Таблица 2. Итоговые оценки качества моделей

Id	Обучающая выборка						Тестовая выборка					
	RMSE	MAPE	$R^2$	$R^2_{adj}$	AIC	BIC	RMSE	MAPE	$R^2$	$R^2_{adj}$	AIC	BIC
R1	1.818	8.279	0.972	0.972	1142.4	1152.1	1.885	8.783	0.969	0.969	521.5	529.5
R2	2.304	10.086	0.955	0.955	1593.1	1602.8	2.974	9.467	0.924	0.923	893.4	901.4
R3	3.513	14.059	0.895	0.894	2396.3	2406.1	3.518	13.300	0.893	0.893	1030.5	1038.5
<b>R4</b>	<b>0.322</b>	<b>1.135</b>	<b>0.999</b>	<b>0.999</b>	<b>-2152.6</b>	<b>-2138.0</b>	<b>0.322</b>	<b>1.146</b>	<b>0.999</b>	<b>0.999</b>	<b>-918.8</b>	<b>-906.8</b>
<b>R5</b>	<b>0.344</b>	<b>1.565</b>	<b>0.999</b>	<b>0.999</b>	<b>-2025.9</b>	<b>-2011.3</b>	<b>0.351</b>	<b>1.639</b>	<b>0.999</b>	<b>0.999</b>	<b>-848.9</b>	<b>-836.8</b>
R6	1.335	5.957	0.985	0.985	553.6	563.3	1.362	6.248	0.984	0.984	255.9	264.0
R7	4.180	17.598	0.851	0.850	2727.5	2737.2	4.406	18.640	0.833	0.832	1214.0	1222.0
L1	2.151	9.294	0.960	0.960	1462.2	1472.0	2.286	10.495	0.955	0.955	678.6	686.6
L2	5.109	17.264	0.777	0.777	3109.3	3119.0	5.433	18.942	0.746	0.744	1385.1	1393.1
L3	9.678	32.293	0.200	0.198	4325.9	4335.6	9.825	34.374	0.168	0.164	1868.5	1876.5
L4	2.894	12.725	0.928	0.928	2029.2	2043.7	3.040	12.245	0.920	0.920	913.3	925.4
L5	4.369	18.157	0.837	0.837	2811.7	2821.4	4.657	19.709	0.813	0.812	1259.4	1267.4
H1	5.245	26.563	0.765	0.764	3159.3	3169.1	5.173	26.235	0.769	0.768	1345.0	1353.1
H2	1.600	7.367	0.978	0.978	898.4	908.1	1.413	6.553	0.983	0.983	286.3	294.3
H3	6.137	24.309	0.678	0.678	3458.3	3468.1	6.344	25.541	0.653	0.652	1511.5	1519.6
<b>H4</b>	<b>0.563</b>	<b>2.695</b>	<b>0.997</b>	<b>0.997</b>	<b>-1086.7</b>	<b>-1072.1</b>	<b>0.544</b>	<b>2.669</b>	<b>0.997</b>	<b>0.997</b>	<b>-490.5</b>	<b>-478.5</b>
H5	1.870	8.352	0.970	0.970	1196.1	1205.8	1.955	9.109	0.967	0.967	551.1	559.1
C1	1.893	7.994	0.969	0.969	1221.1	1235.6	1.998	8.985	0.966	0.965	570.9	582.9
C2	1.870	8.353	0.970	0.970	1198.3	1212.8	1.955	9.110	0.967	0.967	553.2	565.2
<b>C3</b>	<b>0.563</b>	<b>2.695</b>	<b>0.997</b>	<b>0.997</b>	<b>-1086.7</b>	<b>-1072.1</b>	<b>0.544</b>	<b>2.669</b>	<b>0.997</b>	<b>0.997</b>	<b>-490.5</b>	<b>-478.5</b>
C4	4.771	16.198	0.805	0.805	2979.3	2989.0	5.084	17.680	0.777	0.776	1330.8	1338.9
S1	5.893	25.974	0.703	0.703	3381.4	3391.1	5.600	22.986	0.730	0.729	1409.8	1417.8
<b>W1</b>	<b>0.753</b>	<b>2.945</b>	<b>0.995</b>	<b>0.995</b>	<b>-533.0</b>	<b>-518.4</b>	<b>0.840</b>	<b>3.133</b>	<b>0.994</b>	<b>0.994</b>	<b>-136.7</b>	<b>-124.6</b>
G1	0.823	3.706	0.994	0.994	-362.2	-342.8	0.858	3.801	0.994	0.994	-116.7	-100.7
K1	1.894	8.448	0.969	0.969	1219.8	1229.5	1.968	9.197	0.967	0.966	556.6	564.6

выборке  $RMSE = 0.322$ ,  $MAPE = 1.146$ ,  $R^2 = 0.999$ ,  $R^2_{adj} = 0.999$ ,  $AIC = -918.8$ ,  $BIC = -906.8$ . Также хорошее качество подгонки показали модели R5, H4, C3 и W1. На тестовой выборке были получены следующие метрики: для R5 –  $RMSE = 0.351$ ,  $MAPE = 1.639$ ,  $R^2 = 0.999$ ,  $R^2_{adj} = 0.999$ ,  $AIC = -848.9$ ,  $BIC = -836.8$ , для H4 и C3 –  $RMSE = 0.544$ ,  $MAPE = 2.669$ ,  $R^2 = 0.997$ ,  $R^2_{adj} = 0.997$ ,  $AIC = -490.5$ ,  $BIC = -478.5$  и для W1 –  $RMSE = 0.840$ ,  $MAPE = 3.113$ ,  $R^2 = 0.994$ ,  $R^2_{adj} = 0.994$ ,  $AIC = -136.7$ ,  $BIC = -124.6$ . В целом по показателю  $R^2$  16 из 25 моделей (64 %) позволяют объяснить более 90 % вариации зависимой переменной.

Оценки параметров для каждой модели, включая их стандартные ошибки и статистическую значимость, показаны в табл. 3.

Статистически незначимые оценки параметров (при  $p < 0.05$ ) получены только для моделей L2 и L3. При этом данные модели показали одни из худших значений метрик качества. Для модели L2 на тестовой выборке  $RMSE = 5.443$ ,

$MAPE = 18.942$ ,  $R^2 = 0.746$ ,  $R^2_{adj} = 0.744$ ,  $AIC = 1385.1$  и  $BIC = 1393.1$ , а для модели L3 –  $RMSE = 9.825$ ,  $MAPE = 34.374$ ,  $R^2 = 0.168$ ,  $R^2_{adj} = 0.164$ ,  $AIC = 1868.5$  и  $BIC = 1876.5$ .

С учетом метрик качества, оценок параметров и их статистической значимости, результатов графического анализа остатков в качестве лучшей модели хода роста по средней высоте следует считать R4. Во многих исследованиях (Seki, Sakici, 2017; Allen II et al., 2020), как и в нашем случае, отдается предпочтение уравнениям хода роста по высоте, полученным из ростовой функции Митчерлиха. Стоит отметить, что применяемые в работе исходные данные таблиц хода роста изначально были выравнены с применением этой ростовой функции. При использовании данных повторных наблюдений на постоянных пробных площадях или анализа древесных стволов лучший результат могут обеспечить уравнения роста по высоте, основанные на иных базовых функциях (Nunes et al., 2011).

**Таблица 3.** Оценки параметров и их статистическая значимость

Id	Параметр	Оценка	Стандартная ошибка	t-Статистика	p-Value
1	2	3	4	5	6
R1	$b$	1.929E-02	2.616E-04	7.375E+01	< 2e-16
	$c$	1.240E+00	9.912E-03	1.251E+02	< 2e-16
R2	$a$	4.100E+01	3.400E-01	1.206E+02	< 2e-16
	$c$	9.368E-01	8.956E-03	1.046E+02	< 2e-16
R3	$a$	9.279E+01	5.533E+00	1.677E+01	< 2e-16
	$b$	1.067E-03	1.196E-04	8.920E+00	< 2e-16
R4	$b$	1.952E-02	5.433E-05	3.593E+02	< 2e-16
	$c_1$	2.957E+00	1.405E-02	2.104E+02	< 2e-16
	$c_2$	-4.793E-01	3.834E-03	-1.250E+02	< 2e-16
R5	$b$	1.965E-02	5.721E-05	3.435E+02	< 2e-16
	$c_1$	-1.337E-01	1.233E-02	-1.084E+01	< 2e-16
	$c_2$	4.920E+00	4.409E-02	1.116E+02	< 2e-16
R6	$b$	1.913E-02	1.977E-04	9.678E+01	< 2e-16
	$c_1$	9.546E-01	7.570E-03	1.261E+02	< 2e-16
R7	$a_1$	3.138E+00	4.715E-02	6.656E+01	< 2e-16
	$b$	1.825E-02	5.091E-04	3.585E+01	< 2e-16
L1	$b$	9.414E+00	1.344E-01	7.002E+01	< 2e-16
	$c$	5.278E-01	8.163E-03	6.466E+01	< 2e-16
L2	$a$	4.594E-09	1.363E-07	3.371E-02	9.731E-01
	$c$	-2.645E-02	1.529E-02	-1.730E+00	8.392E-02
L3	$b_1$	-6.284E+00	2.079E+01	-3.023E-01	7.625E-01
	$c$	-3.829E-03	1.079E-02	-3.549E-01	7.227E-01
L4	$b_1$	1.943E+01	7.653E-01	2.539E+01	< 2e-16
	$b_2$	-1.425E+01	9.326E-02	-1.528E+02	< 2e-16
	$c$	2.918E-02	8.792E-04	3.319E+01	< 2e-16
L5	$a_1$	5.267E-01	1.445E-02	3.645E+01	< 2e-16
	$c$	4.706E-01	1.348E-02	3.492E+01	< 2e-16
H1	$b$	8.696E-01	1.615E-01	5.386E+00	9.103E-08
	$c$	2.731E-02	9.552E-04	2.859E+01	< 2e-16
H2	$a$	1.127E+01	3.426E-01	3.290E+01	< 2e-16
	$c$	2.169E-02	1.625E-04	1.335E+02	< 2e-16
H3	$a$	4.968E+00	3.117E-01	1.594E+01	< 2e-16
	$b$	1.192E+00	2.980E-02	4.000E+01	< 2e-16
H4	$a_1$	-1.136E+00	4.989E-01	-2.277E+00	2.300E-02
	$b_1$	9.821E+00	1.556E-02	6.313E+02	< 2e-16
	$c$	1.374E+00	3.517E-03	3.907E+02	< 2e-16
H5	$b_1$	1.952E+02	4.332E+00	4.506E+01	< 2e-16
	$c$	1.319E+00	9.237E-03	1.428E+02	< 2e-16
C1	$a_1$	2.691E+05	5.256E+04	5.120E+00	3.706E-07
	$b_1$	-4.361E+01	6.019E+00	-7.245E+00	8.922E-13
	$c$	3.172E+00	3.655E-02	8.678E+01	< 2e-16
C2	$a_1$	-5.144E+05	4.458E-14	-1.154E+19	< 2e-16
	$b_1$	3.794E-04	8.425E-06	4.503E+01	< 2e-16
	$c$	1.319E+00	9.243E-03	1.427E+02	< 2e-16
C3	$a_1$	-1.136E+00	4.989E-01	-2.277E+00	2.300E-02
	$b_1$	9.208E+03	1.432E+02	6.428E+01	< 2e-16
	$c$	1.374E+00	3.517E-03	3.907E+02	< 2e-16
C4	$a$	-3.156E+09	9.398E-21	-3.358E+29	< 2e-16
	$c$	5.906E-01	6.013E-03	9.822E+01	< 2e-16

Окончание табл. 3

1	2	3	4	5	6
S1	$b_1$	-6.018E+01	4.761E+00	-1.264E+01	< 2e-16
	$c$	-1.113E+00	2.441E-02	-4.559E+01	< 2e-16
W1	$b_1$	3.913E+01	4.805E-01	8.144E+01	< 2e-16
	$b_2$	-6.442E+00	1.274E-01	-5.057E+01	< 2e-16
	$c$	2.813E-01	7.937E-04	3.544E+02	< 2e-16
G1	$b$	6.361E-01	4.997E-02	1.273E+01	< 2e-16
	$c$	2.036E-02	3.326E-04	6.122E+01	< 2e-16
	$d_1$	5.036E-01	2.884E-02	1.746E+01	< 2e-16
	$d_2$	2.831E+00	6.855E-02	4.130E+01	< 2e-16
K1	$b$	2.176E+00	2.013E-02	1.081E+02	< 2e-16
	$c$	-1.907E-01	2.508E-03	-7.604E+01	< 2e-16

На рис. 1 показано сопоставление кривых хода роста по средней высоте, прогнозируемых по модели, с данными ТХР. Отклонения кривых, полученных по модели, от данных ТХР незначительны. Это подтверждается рис. 2, где отклонение между фактическими и прогнозируемыми значениями от диагональной прямой  $y = x$  минимальны.

Ошибки модели распределяются в зависимости от выбранного интервала прогнозирования и уровня производительности древостоя. Средняя абсолютная ошибка минимальна (0.60 %) при дальности прогноза 10 лет. С увеличением срока прогнозирования происходит увеличение ошибки. Для всех интервалов дальности прогноза получено значение средней абсолютной ошибки, не превышающее 2.01 % (рис. 3).

Наибольшие средние абсолютные ошибки были получены для  $I^b$  (1.29 %),  $V$  (1.51 %),  $V^a$  (2.21 %) и  $V^b$  (1.13 %) классов бонитета (рис. 4).

Модели роста древостоев, основанные на применении методологии GADA, рекомендуются во многих исследованиях, так как позволяют более реалистично передать процесс изменения таксационных показателей от возраста и имеют более гибкие оценки по сравнению с ранее разработанными моделями зависимости таксационных показателей от возраста древостоя (Cieszewski, Bailey, 2000; Cieszewski, 2002, 2003; Nunes et al., 2011; Ercanli et al., 2014).

В России разработано большое количество бонитетных шкал и их обобщений (Выводцев, 1984; Швиденко и др., 2008; Хлюстов, 2015) для

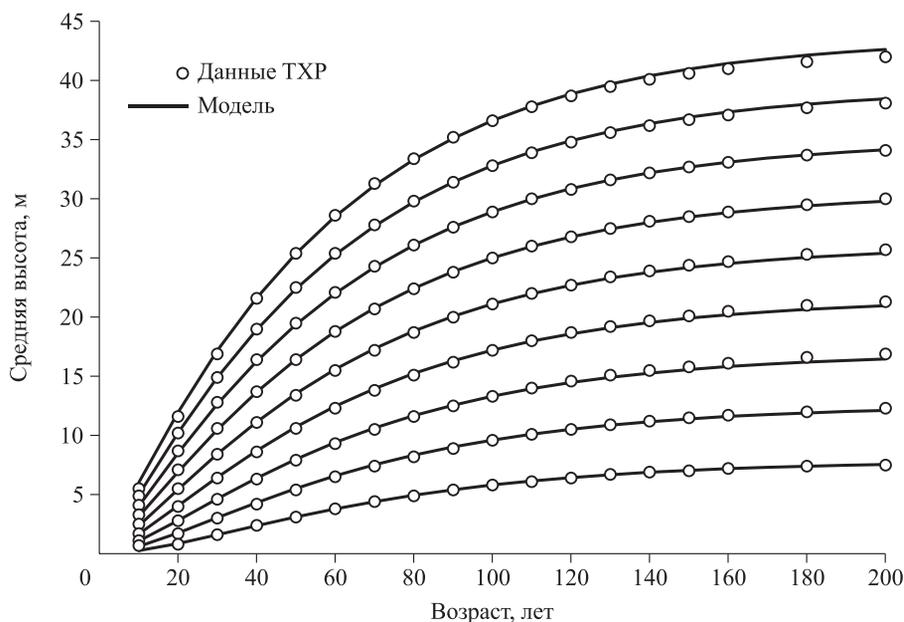


Рис. 1. Прогнозируемые по модели (R4) кривые хода роста сосновых древостоев ( $t_0 = 100$  лет).

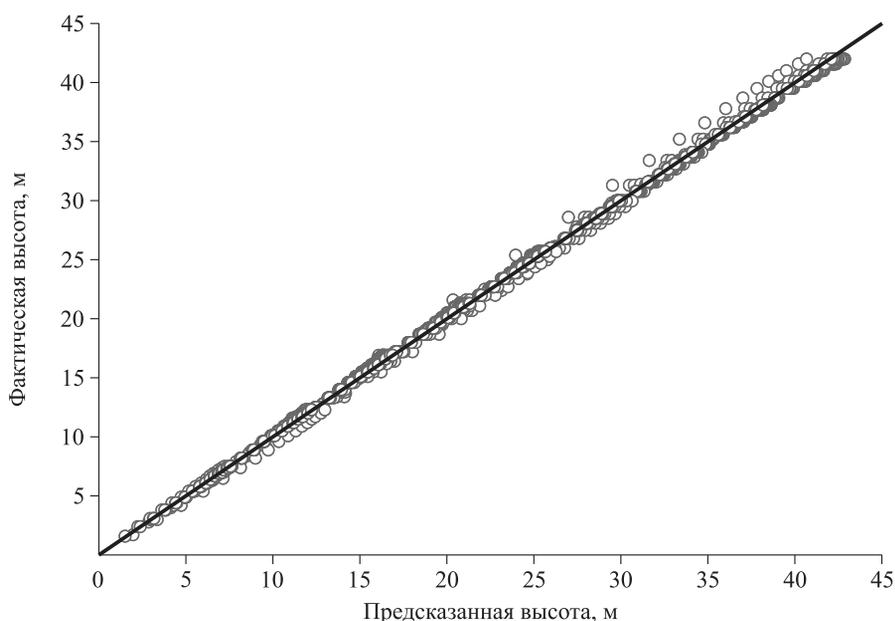


Рис. 2. Соответствие фактических и предсказанных по модели значений средней высоты.

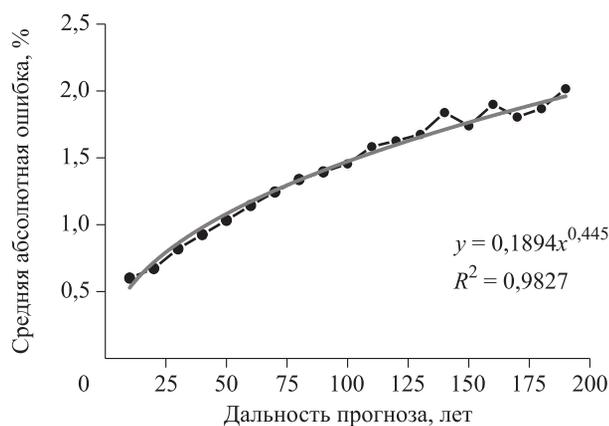


Рис. 3. Зависимость средней абсолютной ошибки от дальности прогноза.

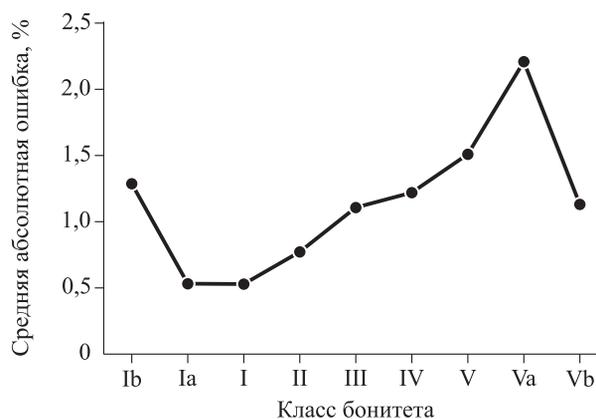


Рис. 4. Зависимость средней абсолютной ошибки от класса бонитета.

различных местообитаний и древесных пород. Для точной оценки производительности лесных участков необходимы новые бонитетные шкалы, инвариантные относительно базового возраста и основанные на более реалистичном описании процесса роста древостоев. Такие соотношения между высотой и возрастом, полученные с применением GADA, могут успешно применяться в имитационных моделях средних таксационных показателей древостоев (Hevia et al., 2013; Stankova, 2016; Allen II et al., 2020).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основанная на методологии GADA модель Митчерлиха (уравнение R4), разработанная в данном исследовании, полиморфна, имеет фор-

му S-образной кривой и переменные асимптоты, т. е. учитывает большинство предъявляемых свойств к моделям хода роста по высоте. Кроме того, данная модель инвариантна относительно базового возраста прогнозирования и напрямую оценивает ход роста и класс бонитета на основе любого значения средней высоты и возраста и обеспечивает последовательные прогнозы. Таким образом, она может быть рекомендована для оценки хода роста сосновых древостоев по средней высоте и класса бонитета сосновых древостоев. Рассмотренная в исследовании методика может быть применена для разработки моделей хода роста таксационных показателей других лесообразующих пород России, в том числе с привлечением рядов долговременных наблюдений на постоянных пробных площадях.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Выводцев Н. В. Общие закономерности роста лиственничников Дальнего Востока: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Красноярск: СибТИ, 1984. 21 с.
- Дубенок Н. Н., Кузьмичев В. В., Лебедев А. В. Результаты экспериментальных работ за 150 лет в лесной опытной даче Тимирязевской сельскохозяйственной академии. М.: Наука, 2020. 382 с.
- Кузьмичев В. В. Закономерности роста древостоев. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1977. 160 с.
- Кузьмичев В. В. Закономерности динамики древостоев: принципы и модели. Новосибирск: Наука, 2013. 207 с.
- Лебедев А. В. Динамика продуктивности и средообразующих свойств древостоев в условиях городской среды (на примере лесной опытной дачи Тимирязевской академии): автореф. дис. ... канд. с.-х. наук: 06.03.02. СПб: СПбГЛТУ, 2019. 20 с.
- Хлюстов В. К. Комплексная оценка и управление древесными ресурсами: модели-нормативы-технологии. М.: РГАУ-МСХА им. К. А. Тимирязева, 2015. Кн. 1. 389 с.
- Хлюстов В. К., Лебедев А. В. Товарно-денежный потенциал древостоев и оптимизация лесопользования. Иркутск: Мегаринт, 2017. 328 с.
- Швиденко А. З., Щепаченко Д. Г., Нильсон С., Булуй Ю. И. Таблицы и модели хода роста и продуктивности насаждений основных лесообразующих пород Северной Евразии (нормативно-справочные материалы). Изд. 2-е, доп. М.: Междунар. ин-т приклад. систем. анализа, 2008. 886 с.
- Allen II M. G., Antón-Fernández C., Astrup R. A stand-level growth and yield model for thinned and unthinned managed Norway spruce forests in Norway // *Scand. J. For. Res.* 2020. V. 35. Iss. 5–6. P. 238–251.
- Amaro A., Reed D., Tomé M., Themido I. Modeling dominant height growth: Eucalyptus plantations in Portugal // *For. Sci.* 1998. V. 44. Iss. 1. P. 37–46.
- Bailey R. L., Clutter J. L. Base-age invariant polymorphic site curves // *For. Sci.* 1974. V. 20. Iss. 2. P. 155–159.
- Castedo-Dorado F., Diéguez-Aranda U., Barrio-Anta M., Álvarez-González J. G. Modelling stand basal area growth for radiata pine plantations in Northwestern Spain using the GADA // *Ann. For. Sci.* 2007. V. 64. P. 609–619.
- Cieszewski C. J. Comparing fixed- and variable-base-age site equations having single versus multiple asymptotes // *For. Sci.* 2002. V. 48. Iss. 1. P. 7–23.
- Cieszewski C. J. Developing a well-behaved dynamic site equation using a modified Hossfeld IV function  $Y^3 = (ax^m)/(c + x^{m-1})$ , a simplified mixed model and scant subalpine fir data // *For. Sci.* 2003. V. 49. Iss. 4. P. 539–554.
- Cieszewski C. J., Bailey R. L. Generalized algebraic difference approach: theory based derivation of dynamic site equations with polymorphism and variable asymptotes // *For. Sci.* 2000. V. 46. Iss. 1. P. 116–126.
- Cieszewski C. J., Bella I. E. Polymorphic height growth and site index curves for lodgepole pine in Alberta // *Can. J. For. Res.* 1989. V. 19. N. 9. P. 1151–1160.
- Cieszewski C. J., Strub M., Zasada M. New dynamic site equation that fits best the Schwappach data for Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in Central Europe // *For. Ecol. Manag.* 2007. V. 243. Iss. 1. P. 83–93.
- Elfving B., Kiviste A. Construction of site index equations for *Pinus sylvestris* L. using permanent plot data in Sweden // *For. Ecol. Manag.* 1997. V. 98. Iss. 2–3. P. 125–134.
- Ercanli İ., Kahrman A., Yavuz H. Dynamic base-age invariant site index models based on generalized algebraic difference approach for mixed Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) and Oriental beech (*Fagus orientalis* Lipsky) stands // *Turk. J. Agr. For.* 2014. V. 38. P. 134–147.
- Hevia A., Vilčko F., Álvarez-González J. G. Dynamic stand growth model for Norway spruce forests based on long-term experiments in Germany // *Recursos Rurais.* 2013. N. 9. P. 45–54.
- Hossfeld J. W. *Mathematik für Forstmänner, Ökonomen und Cameralisten.* Gotha, 1822. 310 p.
- Jarosz K., Kłapek B. Modelowanie wzrostu drzewostanów z wykorzystaniem funkcji Gompertza // *Sylwan.* 2002. N. 4. P. 35–42.
- Korsuň F. Život normálního porostu ve vzorcích // *Lesnická práce.* 1935. V. 14. P. 289–300.
- Lundqvist B. On the height growth in cultivated stands of pine and spruce in Northern Sweden // *Medd. Fran. Statens Skogforsk.* 1957. V. 47. P. 1–64.
- Neter J., Kutner M. H., Nachtsheim C. J., Wasserman W. *Applied linear statistical models.* Chicago, IL: Irwin, 1996. 1408 p.
- Nunes L., Patrício M., Tomé J., Tomé M. Modeling dominant height growth of maritime pine in Portugal using GADA methodology with parameters depending on soil and climate variables // *Ann. For. Sci.* 2011. V. 68. P. 311–323.
- Richards F. J. A flexible growth function for empirical use // *J. Exp. Bot.* 1959. V. 10. N. 29. P. 290–301.
- Ryan T. P. *Modern regression methods.* New York: John Wiley & Sons, 1997. 529 p.
- Schumacher F. X. A new growth curve and its application to timber yield studies // *J. For.* 1939. V. 37. N. 3. P. 819–820.
- Seki M., Sakici O. E. Dominant height growth and dynamic site index models for Crimean pine in the Kastamonu-Tasköprü region of Turkey // *Can. J. For. Res.* 2017. V. 47. Iss. 11. P. 1441–1449.
- Stankova T. V. A dynamic whole-stand growth model, derived from allometric relationships // *Silva Fenn.* 2016. V. 50. N. 1. Article id 1406. 21 p.
- Tomé M. Modelação do crescimento da árvore individual em povoamentos de *Eucalyptus globulus* Labill. (1ª rotação). PhD Thesis. Região Centro de Portugal. Univ. Técnica de Lisboa, 1989. 230 p.
- Nunes L., Patrício M., Tomé N. P., Tomé M. Modeling dominant height growth of maritime pine in Portugal using GADA methodology with parameters depending on soil and climate variables // *Ann. For. Sci.* 2011. V. 68. Iss. 2. P. 311–323.
- Vargas-Larreta B., Aguirre-Calderón O. A., Corral-Rivas J. J., Crecente-Campo F., Diéguez-Aranda U. A dominant height growth and site index model for *Pinus pseudostrobus* Lindl. in northeastern Mexico // *Agrociencia.* 2013. V. 47. P. 1–10.
- Yang R. C., Kozak A., Smith J. H. The potential of Weibull-type functions as flexible growth curves // *Can. J. For. Res.* 1978. V. 8. N. 4. P. 424–431.

## **STAND SITE INDEX SCALE DEVELOPMENT USING THE GENERALIZED ALGEBRAIC DIFFERENCE APPROACH**

**A. V. Lebedev, V. V. Kuzmichev**

*Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy  
Timiryazevskaya str., 49, Moscow, 127550 Russian Federation*

---

E-mail: avl1993@mail.ru

The basis for forecasting the growth of forest stands is the site index scales. Expansion of knowledge about the processes of functioning of forest ecosystems, the nature of changes in the process of growth of morphological indicators of trees and stands, their interconnections and interdependencies, and the creation of a more suitable mathematical apparatus and appropriate software for describing biological processes form the prerequisites for formulating and solving the problem of forecasting the growth of stands on higher methodological level. The aim of this work is to assess the predictive ability of the growth equations obtained using the generalized algebraic difference approach (GADA) to describe the course of growth of tree stands at the average height and to construct a site index scale. The data for the study were general tables of the course of growth of complete (normal) pine stands North Eurasian. A total of 25 equations obtained using the GADA approach are analyzed. Comparative analysis showed that the best quality of data alignment is provided by an equation based on the Mitscherlich function (also known as Drakin-Vuevsky, Chapman-Richards) with the replacement of parameters responsible for the limiting values of the height and the shape of the curve. This model is polymorphic, has the shape of a sigmoid curve and variable asymptotes, i.e. takes into account most of the properties imposed on the growth rate models in height. Model errors are distributed depending on the selected forecasting interval and the site index of the stand. With an increase in the forecasting period, an increase in the error occurs. For all intervals of the forecast range, the value of the mean absolute error is not exceeding 2.01 %. The highest average absolute forecast error (1.1–2.2 %) is characteristic of the extreme site index classes ( $I^b$ ,  $V$ ,  $V^a$  and  $V^b$ ). The methodology considered in the study can be applied to develop models of the growth rate of stand inventory variables of other forest-forming species in Russia.

**Keywords:** *tree stands' growth, average height, dynamic equations.*

**How to cite:** *Lebedev A. V., Kuzmichev V. V. Stand site index scale development using the generalized algebraic difference approach // Sibirskij Lesnoj Zhurnal (Sib. J. For. Sci.). 2022. N. 3. P. 48–58 (in Russian with English abstract).*

УДК 630\*52:630\*174.754

## ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ БАЗИСНОЙ ПЛОТНОСТИ ДРЕВЕСИНЫ И КОРЫ ЛЕСООБРАЗУЮЩИХ ПОРОД ЕВРАЗИИ

В. А. Усольцев<sup>1,2</sup>, И. С. Цепордей<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Ботанический сад УрО РАН  
620144, Екатеринбург, ул. 8 Марта, 202а

<sup>2</sup> Уральский государственный лесотехнический университет  
620100, Екатеринбург, Сибирский тракт, 37

E-mail: Usoltsev50@mail.ru, ivan.tsepordey@yandex.ru

Поступила в редакцию 21.02.2022 г.

Квалиметрия надземной и подземной фитомассы деревьев является составной частью исследований биологической продуктивности и углерод депонирующей способности лесного покрова, необходимых для корректной оценки углеродного цикла в его пространственных градиентах и в связи с изменением климата. Основная доля углерода депонируется в стволах деревьев и в значительной степени зависит от базисной плотности (БП) древесины и коры. В работе использована авторская база данных о квалиметрии лесообразующих видов Северной Евразии. Из нее отобраны 3450 модельных деревьев 9 видов древесных. Построенные модели смешанного типа, описывающие зависимости БП древесины и коры деревьев от их дендрометрических показателей, географических координат и видовой принадлежности деревьев, позволили выявить 0.25%-е снижение БП древесины на 1° с. ш. в направлении с юга на север и 0.26%-е на 1° в. д. – в направлении с запада на восток. Снижение БП коры составляет в тех же градиентах соответственно 0.55 % на 1° с. ш. и 0.28 % на 1° в. д. Наибольшая доля объясненной изменчивости БП приходится на видовую принадлежность деревьев – 74 % по древесине и 87 % по коре, существенно меньшая – на географическое положение, соответственно 12 и 9 %, и наименьшая доля – на дендрометрические показатели деревьев, соответственно 14 и 4 %. Выполнено ранжирование древесных видов равновеликих деревьев по значениям БП, которое показало, что каждый вид имеет специфическое соотношение БП древесины и коры. Это означает, что для более точной оценки базисной плотности и депонирования углерода в древесине и коре необходимо обрабатывать изымаемые из стволов диски отдельно по древесине и коре, а не диски в коре в целом.

**Ключевые слова:** *древесина и кора ствола, модель смешанного типа, географическая широта и долгота.*

DOI: 10.15372/SJFS20220307

### ВВЕДЕНИЕ

В последние годы мировая лесная экология характеризуется интенсивными исследованиями биологической продуктивности лесов в предположении антропогенного изменения климата и поиска возможностей его стабилизации. Роль лесов в мире становится все более значимой, поскольку мы вступаем в новую эру, характеризующуюся глобальным стремлением к достижению экономической, социальной и экологической устойчивости. В настоящее время сформировано несколько глобальных баз данных не только по количественным показателям

фитомассы деревьев (Kattge et al., 2020), но и по квалиметрическим показателям, в частности по базисной плотности (БП) древесины различных древесных видов мира, охватывающих различные регионы и имеющих различный объем, качество и доступность (Reyes et al., 1992; Chave et al., 2006; Donegan et al., 2014). Крупнейшая из них (Zanne et al., 2009) содержит данные о БП более 8412 таксонов (1638 родов, 191 семейство) деревьев, что, тем не менее, составляет лишь 10 % от имеющихся 100 тыс. древесных видов. Обсуждается также необходимость стандартизации методов оценки БП (Nogueira et al., 2008). Квалиметрия надземной и подземной фи-

томассы является составной частью исследований биологической продуктивности и углерод депонирующей способности лесного покрова, необходимых для корректной оценки углеродного цикла в земной биосфере в связи с изменением климата (Fujiwara et al., 2007; Pretzsch et al., 2018; Vaughan et al., 2019).

БП древесины относится к ключевым показателям, используемым для определения лесной фитомассы и запасов углерода (Yeboah et al., 2014; Pascoa et al., 2020) и считается одним из наиболее широко используемых критериев оценки качества древесины и ее прочностных свойств. Она представляет собой отношение массы древесины в абсолютно сухом состоянии к ее объему в свежем (растущем) состоянии. Преимущества использования сухой массы в числителе формулы БП древесины заключаются в трех аспектах: (1) корреляция с физико-механическими свойствами древесины; (2) воспроизводимость и сопоставимость результатов; (3) простота преобразования в различные условия влажности при наличии информации об усадке (Koch, 1972).

Известно, что древесина обладает необычным сочетанием полезных свойств. БП является показателем пригодности древесины для многих важных применений и связана с механической прочностью древесины. Это определяет ее использование в качестве сырья для пиломатериалов, конструкционной фанеры и других изделий из древесины, а ее значения определяют выход целлюлозы из данного объема древесины (Koch, 1972; Shepard, Shottafer, 1992). Из-за полезности БП в качестве предиктора качества и прочностных свойств древесины исследователи на протяжении многих лет искали некую легко определяемую ее связь с условиями произрастания деревьев. В первые годы исследований качества древесины (с конца XIX в.) было распространено мнение, что медленно растущая древесина хвойных пород с узкими кольцами превосходит по БП быстрорастущую древесину с широкими кольцами (Larson et al., 2001). Это мнение было подтверждено и современными исследованиями (Roque, Fo, 2007; Zhu et al., 2007; Yeboah et al., 2014; Sousa et al., 2016).

Позднее было установлено, что ширина годичного кольца сама по себе не является достоверным критерием оценки качества древесины. Исследования разных видов сосен (*Pinus* L.) продемонстрировали, что широкие годичные кольца не обязательно связаны со снижением БП (Larson et al., 2001; Gutiérrez et al., 2006). Ког-

да было показано, что плотность поздней древесины хвойных деревьев в 2–3 раза превышает плотность ранней древесины (Trendelenburg, Mayer-Wegelin, 1955), то при последующем учете доли поздней древесины в годичных кольцах оказалось, что она сильно коррелирует с БП (Полубояринов, 1976; Мелехов и др., 2003). БП возрастает в направлении от сердцевины к наружным слоям ствола, и это определяет ее увеличение с возрастом дерева для всего ствола. Данная закономерность имеет общий характер и наблюдается как у быстро-, так и медленно растущих деревьев (Молчанов, 1964; Hakkila, 1966; Полубояринов, 1976; Андрущенко, 1977; Larson et al., 2001; Kiaei et al., 2016).

Исследование изменчивости БП у нескольких видов сосен показало, что она объясняется не столько лесорастительными условиями, сколько генетическими особенностями видов (Thor, Bates, 1970; Fujimoto et al., 2008). Тем не менее в тропических лесах выявлено существенное увеличение БП по мере перехода от влажных к сухим местообитаниям (Pascoa et al., 2020). Связь БП древесины с типами леса показана также в сосновых древостоях России (Мелехов и др., 2003). Во Франции установлено снижение БП древесины в высотном градиенте в направлении вверх по горному склону (Kerfriden et al., 2021). На глобальном уровне сделан анализ изменчивости БП древесины в широтном диапазоне от 52° с. ш. до экватора и установлено увеличение БП на 0.5 % на каждый градус среднегодовой температуры и снижение на 0.02 % на каждый сантиметр среднегодовых осадков (Wiemann, Williamson, 2002). Положительная связь БП с среднегодовой температурой установлена в древостоях дугласии в Новой Зеландии (Kimberley et al., 2017).

У нескольких видов елей (*Picea* A. Dietr.) и сосен выявлено увеличение БП древесины по мере увеличения густоты древостоя (Гордина, 1985; Yang, 2002; Zhu et al., 2007; Yang, Hazenberg, 2011; Yeboah et al., 2014). Однако в 27-летних культурах тополя (*Populus xiaohei* T.S. Hwang & Liang) в Китае и 12-летних культурах клена бархатистого (*Acer velutinum* Boiss.) на севере Ирана связи БП с густотой древостоя не обнаружено (Jiang et al., 2007; Naji et al., 2015).

Таким образом, моделирование связей БП с независимыми переменными, характеризующими морфоструктуру, возраст и физиологию дерева, выполнено лишь в местообитаниях отдельных регионов. Поскольку определяющим фактором роста деревьев является географичес-

кое положение (Zhang, Shi, 2004), необходимо знание географических особенностей изменения БП деревьев. Насколько нам известно, результаты ее исследований в географических градиентах Евразии в открытых источниках отсутствуют, а по показателю БП коры приводятся лишь немногочисленные средние значения (Гусев, 1976; Усольцев, 1985)

Значения БП варьируют не только в поперечном сечении ствола, но и вдоль по стволу (Полубояринов, 1976; Исаева, 1978; Fujimoto et al., 2008; Télles et al., 2011; Sousa et al., 2016; Billard et al., 2021). В настоящем исследовании мы ограничиваемся моделированием средних его показателей для всего ствола дерева, как это было представлено во французской базе данных (Leban et al., 2021).

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Цель наших исследований – выявить географические закономерности изменения БП древесины и коры лесообразующих видов Северной Евразии. Для ее достижения поставлены следующие задачи:

– разработать регрессионные зависимости БП от дендрометрических показателей деревьев, географических координат и видовой принадлежности;

– оценить вклад дендрометрических показателей, географического положения и видовой принадлежности в объяснение изменчивости БП древесины и коры;

– выполнить ранжирование древесных видов по значениям БП древесины и коры.

Для решения поставленных задач использована авторская база данных о квалитметрии лесообразующих пород Северной Евразии (Usoltsev, 2020). Из нее отобраны 3450 модельных деревьев 9 древесных видов, имеющих данные о дендрометрических показателях и БП древесины и коры стволов, а также о положении пробных площадей по широте и долготе (табл. 1). Эмпирические данные БП на пробных площадях получены по 3–10 дискам, выпиленным вдоль по стволу. БП (отдельно древесины и коры) рассчитана в результате обмера и взвешивания дисков, сушки до постоянной массы и повторного взвешивания. БП всего ствола рассчитана как средневзвешенная по площади поперечного сечения дисков.

**Таблица 1.** Статистики показателей 3450 модельных деревьев, включенных в регрессионный анализ

Обозначение статистик	<i>A</i>	<i>D</i>	<i>H</i>	<i>DW</i>	<i>DB</i>	<i>Lat</i>	<i>Lon</i>
1	2	3	4	5	6	7	8
<i>Сосна обыкновенная (Pinus sylvestris L.)</i>							
Mean	46	12.5	11.9	398.4	290.7	–	–
Min	5	1.1	1.4	254.0	164.3	44.6	24.3
Max	186	55.0	36.6	640.4	636.4	79.4	97.0
<i>SD</i>	33.5	9.5	7.1	52.1	61.9	–	–
<i>CV, %</i>	72.8	76.3	59.5	13.1	21.3	–	–
<i>n</i>	966	957	965	966	966	–	–
<i>Кедр сибирский (Pinus sibirica Du Tour) и к. корейский (P. koraiensis Siebold &amp; Zucc.)</i>							
Mean	42	9.3	8.0	354.7	717.9	–	–
Min	15	1.5	1.7	245.8	298.7	43.6	59.9
Max	165	29.3	24.0	509.9	969.5	59.8	132.3
<i>SD</i>	37.5	6.7	5.5	51.1	214.4	–	–
<i>CV, %</i>	90.4	71.5	68.7	14.4	29.9	–	–
<i>n</i>	74	74	74	74	74	–	–
<i>Лиственница (Larix Mill.)</i>							
Mean	81	13.7	12.2	511.7	335.8	–	–
Min	15	0.3	1.4	382.4	186.3	49.2	64.5
Max	400	52.8	30.0	735.5	545.3	67.0	148.0
<i>SD</i>	73.2	8.9	5.5	43.0	69.7	–	–
<i>CV, %</i>	90.5	64.7	44.8	8.4	20.8	–	–
<i>n</i>	193	194	193	194	194	–	–

Окончание табл. 1

1	2	3	4	5	6	7	8
<i>Ель (Picea A. Dietr.)</i>							
Mean	48	12.4	9.1	393.2	433.5	–	–
Min	11	1.0	1.5	238.1	176.7	43.7	12.0
Max	163	51.5	30.6	648.1	866.7	64.0	132.5
SD	32.6	10.2	6.1	64.6	126.5	–	–
CV, %	67.8	81.7	67.5	16.4	29.2	–	–
n	279	279	230	279	279	–	–
<i>Пихта (Abies Mill.)</i>							
Mean	70	20.3	16.3	364.2	429.2	–	–
Min	8	1.6	2.2	272.8	299.1	43.7	22.7
Max	180	46.2	28.9	513.0	606.7	56.8	132.5
SD	40.2	11.0	7.2	41.3	71.1	–	–
CV, %	57.6	54.2	44.5	11.3	16.6	–	–
n	92	92	92	92	92	–	–
<i>Береза (Betula L.)</i>							
Mean	43	14.1	14.3	499.0	532.5	–	–
Min	4	1.0	1.4	312.2	215.1	48.1	26.0
Max	142	48.0	34.5	769.4	993.3	64.0	148.0
SD	22.9	8.0	5.8	46.3	97.9	–	–
CV, %	52.9	57.1	40.7	9.3	18.4	–	–
n	899	901	882	901	901	–	–
<i>Осина (Populus tremula L.)</i>							
Mean	32	15.7	15.3	417.3	468.0	–	–
Min	3	1.1	2.4	301.0	311.0	31.2	30.8
Max	57	45.7	28.8	500.0	692.0	56.7	70.4
SD	13.1	9.0	5.7	23.7	36.1	–	–
CV, %	41.3	57.1	37.3	5.7	7.7	–	–
n	317	317	317	317	317	–	–
<i>Липа (Tilia L.)</i>							
Mean	52	17.7	16.7	415.8	483.8	–	–
Min	10	3.1	4.8	252.3	248.5	43.6	37.4
Max	115	38.6	24.8	647.8	900.0	55.8	132.3
SD	22.2	8.4	5.1	73.6	105.5	–	–
CV, %	42.4	47.7	30.3	17.7	21.8	–	–
n	202	202	187	202	202	–	–
<i>Дуб (Quercus L.)</i>							
Mean	41	16.4	14.9	582.8	412.8	–	–
Min	6	1.9	2.8	450.0	269.6	43.6	27.5
Max	166	50.5	31.5	800.0	800.0	51.5	132.3
SD	23.9	9.4	6.5	50.6	71.4	–	–
CV, %	58.2	57.1	43.9	8.7	17.3	–	–
n	425	425	425	425	425	–	–

*Примечание.* Mean, min и max соответственно среднее, минимальное и максимальное значения; SD – стандартное отклонение; CV – коэффициент вариации; n – число наблюдений; A – возраст дерева, лет; D – диаметр ствола на высоте груди, см; H – высота дерева, м; (Lat) и (Lon) – соответственно широта и долгота местности, град.; DW и DB – соответственно базисная плотность древесины и коры, кг/м<sup>3</sup>.

При моделировании биомассы деревьев получили распространение модели смешанного типа (mixed-effects models) (Molteberg, Nøibø, 2007; Zeng et al., 2011; Fu et al., 2012; Zeng, 2017; Usoltsev et al., 2021a, b). Аллометрическая мо-

дель смешанного типа включает два типа независимых переменных – численные, принимающие значения из непрерывного ряда чисел, и фиктивные, представляющие дискретные качественные характеристики (Дрейпер, Смит, 1973). Древес-

**Таблица 2.** Схема кодирования лесообразующих пород Северной Евразии, у которых определена БП древесины и коры стволов

Порода	Блок фиктивных переменных							
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$	$X_7$	$X_8$
Сосна обыкновенная	0	0	0	0	0	0	0	0
Кедр сибирский и к. корейский	1	0	0	0	0	0	0	0
Лиственница	0	1	0	0	0	0	0	0
Ель	0	0	1	0	0	0	0	0
Пихта	0	0	0	1	0	0	0	0
Береза	0	0	0	0	1	0	0	0
Осина	0	0	0	0	0	1	0	0
Липа	0	0	0	0	0	0	1	0
Дуб	0	0	0	0	0	0	0	1

ные виды (роды) представлены в базе данных крайне неравномерно: от примерно 1000 по сосне обыкновенной до 80 деревьев по кедром сибирскому и корейскому. Разная представленность их как по общему количеству, так и в географических координатах в пределах ареалов, может привести к тому, что закономерности изменения БП для разных древесных видов будут во многом специфичными и несопоставимыми именно по этой причине, тогда как в основе географической изменчивости биологической продуктивности лежат общие для всех видов (родов) биоэкологические и климатические факторы. Всеобщность действия определяющих внешних факторов позволяет предположить однонаправленность реакции видов на эти факторы и соответственно – однотипность (а не видоспецифичность) аллометрических моделей БП (Molteberg, Nøibø, 2007). Исходя из качественного уровня имеющейся базы данных, мы предполагаем в первом приближении построить аллометрические модели БП смешанного типа, включающие как численные (дендрометрические показатели и географические координаты), так и фиктивные переменные, кодирующие видовую принадлежность исходных данных (табл. 2).

Мы приняли следующую структуру аллометрической модели смешанного типа:

$$\ln(DW) \text{ и } \ln(DB) = a_0 + b_1 \ln(A) + b_2 \ln(D) + b_3 \ln(H) + b_4 \ln(Lat) + b_5 \ln(Lon) + \sum a_i X_i, \quad (1)$$

где  $\sum a_i X_i$  – блок фиктивных переменных в количестве  $(i + 1)$ ;  $a_0$  – свободный член уравнения, скорректированный на логарифмическое преобразование модели (Baskerville, 1972);  $b_1$ – $b_5$  – регрессионные коэффициенты при численных переменных уравнения.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате регрессионного анализа получены модели:

– для БП древесины ствола

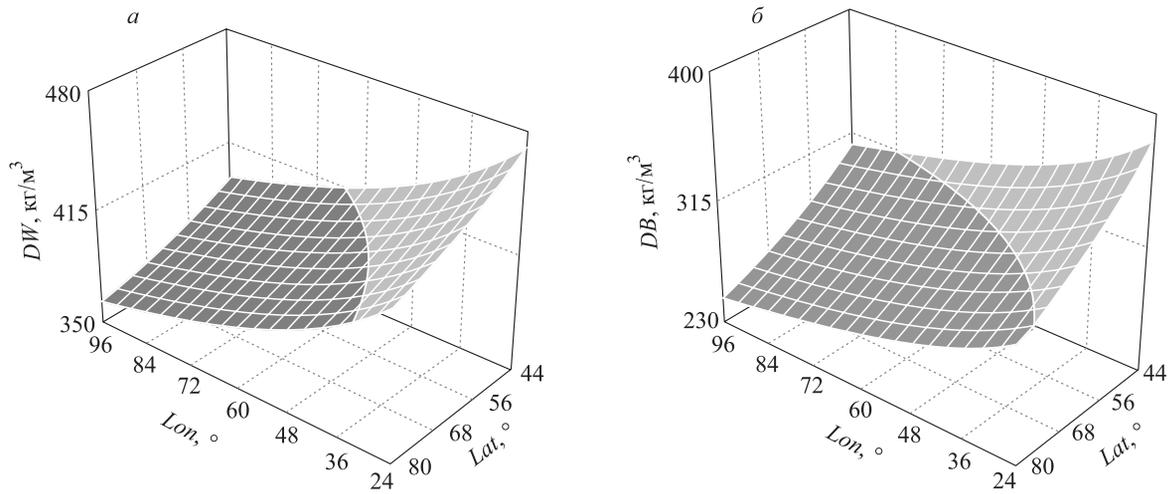
$$\ln(DW) = 6.9597 + 0.0876 \ln A - 0.0680 \ln H - 0.1478 \ln(Lat) - 0.1290 \ln(Lon) - 0.1201X_1 + 0.2690X_2 - 0.0559X_3 - 0.1716X_4 + 0.2332X_5 + 0.0878X_6 + 0.0285X_7 + 0.2973X_8; \\ R^2_{adj} = 0.640; SE = 0.10, \quad (2)$$

– и для БП коры ствола

$$\ln(DB) = 7.9764 - 0.0529 \ln H - 0.3665 \ln(Lat) - 0.1598 \ln(Lon) + 0.78741X_1 + 0.1853X_2 + 0.2978X_3 + 0.2711X_4 + 0.5641X_5 + 0.4487X_6 + 0.4477X_7 + 0.1683X_8; \\ R^2_{adj} = 0.554; SE = 0.20. \quad (3)$$

Численные переменные во всех уравнениях (1) оказались значимыми на уровне  $p < 0.001$ . Диаметр ствола в модели (2) и диаметр ствола и возраст дерева в модели (3) оказались статистически незначимы на уровне  $p < 0.05$  и были исключены из числа независимых переменных. Судя по знакам регрессионных коэффициентов при переменных  $\ln(Lat)$  и  $\ln(Lon)$ , БП древесины и коры деревьев всех 9 видов в пределах их ареалов снижается в направлениях с юга на север и с запада на восток.

Для геометрического 3D-изображения моделей (2) и (3) в координатах широты и долготы в них были подставлены средние значения возраста и высоты дерева. Благодаря специфике фиктивных переменных, видовые различия 3D-изображений в координатах широты и долготы определяются только значением свободного члена, т. е. сдвигом 3D-поверхности по оси ор-



**Рис. 1.** Расчетные значения БП древесины (а) и коры (б) сосны обыкновенной в градиентах широты и долготы при неизменных дендрометрических показателях дерева.

динат. Поскольку конфигурация трехмерной геометрической интерпретации моделей (2) и (3) для всех древесных видов одна и та же, на рис. 1 она показана только для сосны обыкновенной.

Снижение БП древесины составляет в широтном градиенте 0.25 % на 1° с. ш. и в долготном – 0.26 % на 1° в. д. (рис. 1, а, а для коры – соответственно 0.55 % на 1° с. ш. и 0.28 % на 1° в. д. (рис. 1, б).

Результаты регрессионного анализа дали возможность выполнить вторую задачу нашего исследования – оценить вклады дендрометрических переменных, географического положения пробных площадей и видовой принадлежности в объяснение изменчивости БП древесины и коры стволов (табл. 3).

Судя по данным табл. 3, дендрометрические переменные объясняют изменчивость БП на уровне 4–14 %, географическое положение – 7–10 %, и наибольший вклад в общую изменчивость БП вносит видовой принадлежность деревьев – 74–87 %. Это соответствует выводу французских исследователей (Kerfriden et al., 2021), что внутривидовая изменчивость БП несопоставимо меньше по сравнению с межвидовой.

Столь высокий вклад в изменчивость БП видовой принадлежности предполагает очень большое различие видов по данному показателю, и в этой связи представляет интерес их ранжирование.

Диаграмма распределения древесных видов по БП построена по средним для всех видов значениям возраста дерева (45 лет) и его высоты (13.8 м), в координатах 60° с. ш. и 60° в. д. Диаграмма убывающей последовательности видов по величине БП представлена на рис. 2.

Базисная плотность древесины снижается в последовательности: дуб, лиственница, береза, осина, липа, сосна, ель, кедр и пихта (рис. 2). Закономерность снижения БП коры совершенно другая: кедр, береза, осина, липа, ель, пихта, лиственница, дуб и сосна. Это означает, что каждый из исследованных видов характеризуется специфичным соотношением БП древесины и коры. Следовательно, при оценке фитомассы стволов деревьев в абсолютно сухом состоянии с целью повышения точности результата необходимо замерять объем и массу диска отдельно для древесины и коры, а не диска в коре в целом, как это часто практиковалось и продолжает практиковаться в отечественных (Молчанов, 1971; Казимиров, Морозова, 1973; Казимиров и др., 1977; Семечкина, 1978; Колтунова и др., 2007) и зарубежных (Burger, 1953; Karizumi, 1974; Vyskot, 1981; Broshtilova, 1983; Le Goff, 2019) исследованиях фитомассы деревьев.

**Таблица 3.** Влияние дендрометрических переменных, географического положения пробных площадей и видовой принадлежности на изменчивость БП древесины и коры стволов, %

Номер модели	A (I)	H (II)	(I) + (II)	(Lat) (III)	(Lon) (IV)	(III) + (IV)	$\Sigma a_i X_i$
(2)	8.4	5.9	14.3	2.0	10.0	12.0	73.7
(3)	–	4.0	4.0	2.5	6.9	9.4	86.6

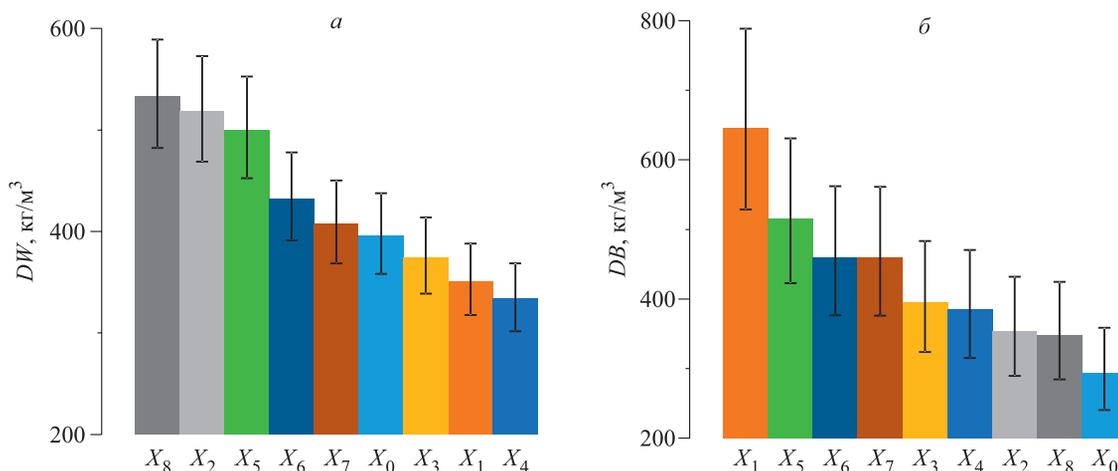


Рис. 2. Базисная плотность древесины (а) и коры (б) равновеликих деревьев 9 лесообразующих видов Евразии в убывающей последовательности. Кодировку древесных видов X<sub>0</sub>–X<sub>8</sub> см. в табл. 2.

Таким образом, мы установили статистически значимую закономерность снижения БП древесины и коры равновеликих стволов деревьев в направлениях с юга на север и с запада на восток в пределах ареалов 9 лесообразующих видов Евразии. Тем самым мы подтвердили ранее выявленное увеличение БП древесины в направлении от полюсов к экватору как в Северном, так и в Южном полушариях (Полубояринов, 1976; Tsoumis, Panagiotidis, 1980). Увеличение БП в направлении с севера на юг было также выявлено в США для некоторых видов сосен, но лишь в отдельных штатах – Техасе, Флориде, Алабаме, а также вдоль Атлантического побережья от Северной Каролины до Флориды (Taras, Saucier, 1968; Koch, 1972). Аналогичные тренды установлены в направлении с севера на юг в Норвегии и Финляндии (Полубояринов, 1976). Иной результат получен по данным 1012 деревьев 60 видов Японии: практически ни по одному виду не было выявлено региональных различий по БП (Fujiwara et al., 2007). Не установлено географических закономерностей в изменении БП также по некоторым видам сосен в США (Saucier, Taras, 1969).

В результате проведенного исследования выявлена статистически значимая положительная связь БП древесины с возрастом дерева и отрицательная с его высотой, что, как отмечалось выше, связано с увеличением доли поздней древесины как с возрастом дерева, так и с изменением его положения в древесном пологе по классу Крафта. Тем самым мы подтвердили ранее установленные закономерности повышения БП с возрастом дерева у сосны ладанной (*Pinus*

*taeda* L.) (Larson et al., 2001), в культурах сосны обыкновенной (Андрущенко, 1977), а также у дуба, ясеня (*Fraxinus* L.), ильма (*Ulmus* L.), липы и клена остролистного (*Acer platanoides* L.) в Европейской части России (Молчанов, 1964).

Отрицательная связь БП древесины с размером дерева (связанным с его классом Крафта) показана ранее в сосняках-беломошниках Архангельской области в разных классах возраста (Молчанов, 1974), у ели в Карелии (Казимиров, Морозова, 1973) и у псевдотсуги Мензиса (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) в США (Vahey et al., 2007). Однако противоположная закономерность показана в сосняках Сибири (Гордина, 1985), а также в сосняках, ельниках и березняках Латвии (Lierpiņš J., Lierpiņš K., 2017). Согласно исследованию, проведенному в субтропиках Китая (Chen et al., 2017), повышенная БП у подавленных деревьев по отношению к деревьям-лидерам наблюдалась лишь у теневыносливых видов, а у светолюбивых закономерность была противоположной.

Выявленная отрицательная связь БП коры с высотой дерева связана, по-видимому, с увеличением доли корки (омертвевшей наружной части коры) по мере увеличения высоты дерева и связанного с ней возраста. Насколько нам известно, какие-либо закономерности изменения БП коры с размером и возрастом дерева в литературе отсутствуют. Косвенно указанную закономерность изменения БП с высотой дерева подтверждают результаты А. П. Андрущенко (1977), установившего снижение БП коры в культурах сосны обыкновенной с 330 до 306 кг/м³ при увеличении возраста с 26 до 100 лет.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Построенные в нашей работе модели зависимости БП древесины и коры деревьев от их дендрометрических показателей, географических координат и видовой принадлежности деревьев позволили установить статистически значимую закономерность снижения БП древесины и коры равновеликих деревьев в направлениях с юга на север и с запада на восток, действительную в пределах ареалов 9 лесообразующих видов Евразии.

В построенных моделях дендрометрические переменные объясняют изменчивость БП на 4–14 % и географическое положение – на 7–10 %. Наибольший вклад в объяснение общей изменчивости БП (74–87 %) вносит видовой принадлежность деревьев.

Установлено, что каждый из исследованных видов характеризуется специфичным соотношением БП древесины и коры. Следовательно, при оценке фитомассы стволов деревьев в абсолютно сухом состоянии с целью повышения точности результата необходимо замерять объем и массу диска отдельно для древесины и коры, а не диска в коре в целом.

Установленные закономерности изменения БП древесины и коры основных лесообразующих видов Евразии в зависимости от возраста, линейных размеров деревьев и географического положения должны внести вклад в более корректную оценку депонирования углерода в стволах, составляющих наибольшую долю в фитомассе деревьев.

*Работа выполнена согласно государственному заданию Ботанического сада УрО РАН.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Андрущенко А. П. Надземная фитомасса древостоев разного возраста в свежей субори // Тр. Харьков. с.-х. ин-та. Т. 240. Харьков, 1977. С. 53–56.

Гордина Н. П. Пространственная структура и продуктивность сосняков Нижнего Енисея. Красноярск: Изд-во Краснояр. ун-та, 1985. 128 с.

Гусев И. И. Фракционный состав елового древостоя по элементам фитомассы // Учет лесного фонда и организация лесного хозяйства. Красноярск: СибТИ, 1976. Вып. 5. С. 25–30.

Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. М.: Статистика, 1973. 392 с.

Исаева Л. Н. Метод расчета локальной и средней плотности абсолютно сухой древесины в стволах сосны и лиственницы // Лесоведение. 1978. № 4. С. 90–94.

Казимиров Н. И., Волков А. Д., Зябченко С. С., Иванчиков А. А., Морозова Р. М. Обмен веществ и энергии в

сосновых лесах Европейского Севера. Л.: Наука. Ленингр. отд-ние, 1977. 304 с.

Казимиров Н. И., Морозова Р. М. Биологический круговорот веществ в ельниках Карелии. Л.: Наука. Ленингр. отд-ние, 1973. 175 с.

Колтунова А. И., Усольцев В. А., Пальмова Н. В., Балицкий М. И., Кузьмин Н. И., Канунникова О. В. Фитомасса лесных культур в Оренбургской области // Актуальные проблемы лесного комплекса. Брянск: БГИТА, 2007. Вып. 17. С. 176–179.

Мелехов В. И., Бабич Н. А., Корчагов С. А. Качество древесины сосны в культурах. Архангельск: АГТУ, 2003. 110 с.

Молчанов А. А. Научные основы ведения хозяйства в дубравах лесостепи. М.: Наука, 1964. 255 с.

Молчанов А. А. Продуктивность органической массы в лесах различных зон. М.: Наука, 1971. 275 с.

Молчанов А. А. Продуктивность органической массы в сосняках-беломошниках // Продуктивность органической и биологической массы леса. М.: Наука, 1974. С. 24–42.

Полубояринов О. И. Плотность древесины. М.: Лесн. пром-сть, 1976. 160 с.

Семечкина М. Г. Структура фитомассы сосняков. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1978. 165 с.

Усольцев В. А. Моделирование структуры и динамики фитомассы древостоев. Красноярск: Изд-во Краснояр. ун-та, 1985. 191 с.

Baskerville G. L. Use of logarithmic regression in the estimation of plant biomass // Can. J. For. Res. 1972. V. 2. N. 1. P. 49–53.

Billard A., Bauer R., Mothe F., Colin F., Longuetaud F. Vertical variations in wood basic density for two softwood species // Europ. J. For. Res. 2021. V. 140. P. 1401–1416.

Broshtilova M. Aboveground phytomass of young *Quercus longipes* Stev. plantations on two site types // For. Sci. (Sofia). 1983. V. 20. Iss. 6. P. 40–50.

Burger H. Holz, Blattmenge und Zuwachs. XIII. Mitteilung. Fichten im gleichalterigen Hochwald // Mitteil. Schweiz. Anst. forstl. Versuchsw. 1953. V. 29. Iss. 1. P. 37–130.

Chave J., Muller-Landau H. C., Baker T. R., Easedale T. A., Ter Steege H., Webb C. O. Regional and phylogenetic variation of wood density across 2,456 neotropical tree species // Ecol. Appl. 2006. V. 16. Iss. 6. P. 2356–2367.

Chen L., Xiang W., Wu H., Lei P., Zhang S., Ouyang S., Deng X., Fang X. Tree growth traits and social status affect the wood density of pioneer species in secondary subtropical forest // Ecol. Evol. 2017. V. 7. Iss. 14. P. 5366–5377.

Donegan E., Sola G., Cheng Z., Birigazzi L., Gamarra J. G.-P., Henry M., Vieilledent G., Chiti T. GlobAllomeTree's wood density database. Rome, Italy, 2014. P. 1–29.

Fu L. Y., Zeng W. S., Tang S. Z., Sharma R. P., Li H. K. Using linear mixed model and dummy variable model approaches to construct compatible single-tree biomass equations at different scales – A case study for Masson pine in Southern China // J. For. Sci. 2012. V. 58. Iss. 3. P. 101–115.

Fujimoto T., Kita K., Kuromaru M. Genetic control of intraring wood density variation in hybrid larch (*Larix gmelinii* var. *japonica* × *L. kaempferi*) // Wood Sci. Technol. 2008. V. 42. Iss. 3. P. 227–240.

Fujiwara T., Yamashita K., Kuroda K. Basic densities as a parameter for estimating the amount of carbon removal

- by forests and their variation // Bull. FFPRI. 2007. V. 6. Iss. 4. P. 215–226.
- Gutiérrez O. A., Baonza M. V., Fernández-Golfín Seco J. I., Conde G. M., Hermoso P. E. Effect of growth conditions on wood density of Spanish *Pinus nigra* // Wood Sci. Technol. 2006. V. 40. Iss. 3. P. 190–204.
- Hakkila P. Investigations on the basic density of Finnish pine, spruce and birch wood // Comm. Inst. For. Fenn. 1966. V. 61. Iss. 5. P. 1–98.
- Jiang Z.-H., Wang X.-Q., Fei B.-H., Ren H.-Q., Liu X.-E. Effect of stand and tree attributes on growth and wood quality characteristics from a spacing trial with *Populus xiaohai* // Ann. For. Sci. 2007. V. 64. P. 807–814.
- Karizumi N. The mechanism and function of tree root in the process of forest production. (I). Methods of investigation and estimation of the root biomass // Bull. Gov. For. Exp. Sta. 1974. V. 259. P. 1–99.
- Katze J., Bönisch G., Díaz S., Lavorel S., Prentice I. C., Leadley P. et al. TRY plant trait database – enhanced coverage and open access // Glob. Change Biol. 2020. V. 26. Iss. 1. P. 119–188.
- Kerfriden B., Bontemps J.-D., Leban J.-M. Variations in temperate forest stem biomass ratio along three environmental gradients are dominated by interspecific differences in wood density // Plant Ecol. 2021. V. 222. Iss. 3. P. 289–303.
- Kiaei M., Naji H. R., Abdul-Hamid H., Farsi M. Radial variation of fiber dimensions, annual ring width, and wood density from natural and plantation trees of alder (*Alnus glutinosa*) wood // Wood Res. 2016. V. 61. Iss. 1. P. 55–64.
- Kimberley M. O., McKinley R. B., Cown D. J., Moore J. R. Modelling the variation in wood density of New Zealand-grown Douglas-fir // N. Z. J. For. Sci. 2017. V. 47. Iss. 1. P. 1–15.
- Koch P. Utilization of the southern pines. 1. The raw material. USDA For. Serv. Agr. Handbook, 1972. V. 420. 736 p.
- Larson P. R., Kreischmann D. E., Clark A. III, Isebrands J. G. Formation and properties of juvenile wood in southern pines: a synopsis. USDA For. Serv. Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-129P, 2001. 42 p.
- Le Goff N. Above and belowground biomass data for a set of beech trees of different age and crown classes sampled in Hesse state forest (NE France) with a view to analyzing the distribution and the allocation of biomass in the tree, 2019.
- Leban J.-M., Kerfriden B., Jacquin P., Lacarin M., Taupin A., Mola C., Duprez C., Chabot S., Dauffy V., Morneau F., Wurpillot S., Hervé J.-C. Wood basic density for 125 tree forest species from the French forests, 2021.
- Liepiņš J., Liepiņš K. Mean basic density and its axial variation in Scots pine, Norway spruce and birch stems // Res. Rural Dev. 2017. V. 1. P. 21–27.
- Molteberg D., Høibø O. Modelling of wood density and fibre dimensions in mature Norway spruce // Can. J. For. Res. 2007. V. 37. Iss. 8. P. 1373–1389.
- Naji H. R., Nia M. F., Kiaei M., Abdul-Hamid H., Soltani M., Faghihi A. Effect of intensive planting density on tree growth, wood density and fiber properties of maple (*Acer velutinum* Boiss.) // IForest. 2015. V. 9. P. 325–329.
- Nogueira E. M., Fearnside P. M., Nelson B. W. Normalization of wood density in biomass estimates of Amazon forests // For. Ecol. Manag. 2008. V. 256. Iss. 5. P. 990–996.
- Pascoa K., Gomide L., Tng D. Y. P., Scolforo J. R. S., Filho A. C. F., Mello J. M. de. How many trees and samples are adequate for estimating wood-specific gravity across different tropical forests? // Trees. 2020. V. 34. P. 1383–1395.
- Pretzsch H., Biber P., Schütze G., Kemmerer J., Uhl E. Wood density reduced while wood volume growth accelerated in Central European forests since 1870 // For. Ecol. Manag. 2018. V. 429. P. 589–616.
- Reyes G., Brown S., Chapman J., Lugo A. E. Wood densities of tropical tree species. USDA For. Serv., Southern For. Exp. St., New Orleans. Gen. Tech. Rep. SO-88, 1992. 15 p.
- Roque R. M., Fo M. T. Wood density and fiber dimensions of *Gmelina arborea* in fast growth trees in Costa Rica: relation to the growth rate // Invest. Agr.: Sistemas y Recursos For. 2007. V. 16. Iss. 3. P. 267–276.
- Saucier R., Taras M. A. Regional variation in specific gravity of seven pines in the Southern United States. USDA For. Serv. Res. Pap. SE-45, 1969. 16 p.
- Shepard K. R., Shottafer J. E. Specific gravity and mechanical property-age relationships in red pine // For. Prod. J. 1992. V. 42. Iss. 7/8. P. 60–66.
- Sousa V. B., Louzada J. L., Pereira H. Age trends and within-site effects in wood density and radial growth in *Quercus faginea* mature trees // For. Syst. 2016. V. 25. Iss. 1. e053.
- Taras M. A., Saucier J. R. Wood density surveys of the minor species of yellow pine in the Eastern United States. I. Spruce pine (*Pinus glabra* Walt.). USDA For. Serv. Res. Pap. SE-34, 1968. 15 p.
- Télles J. R. G., Martínez A. V., la Rosa A. B. de, Grande J. C., Mendoza C. P. Radial variation of basic density in *Pinus patula* Schltdl. et Cham. in three locations from Hidalgo state // Rev. Mex. Cien. For. 2011. V. 2. Iss. 7. P. 71–78.
- Thor E., Bates A. L. Relationships of some wood properties of shortleaf pine with radial growth and site factors // TAPPI. 1970. V. 53. P. 290–294.
- Trendelenburg R., Mayer-Wegelin H. Das Holz als Rohstoff. München: Carl Hanser Verlag, 1955. 541 p.
- Tsoumis G., Panagiotidis N. Effect of growth conditions on wood quality characteristics of black pine (*Pinus nigra* Arn.) // Wood Sci. Technol. 1980. V. 14. P. 301–310.
- Usoltsev V. A. Stem taper, density and dry matter content in biomass of trees growing in Central Eurasia: CD-monograph. Yekaterinburg: Ural St. For. Engineer. Univ.; Bot. Garden Rus. Acad. Sci., Ural Br., 2020. <https://elar.usfeu.ru/handle/123456789/9649>
- Usoltsev V. A., Shobairi S. O. R., Tsepordey I. S., Chasovskikh V. P. Augmentative modelling: A template for *Populus* sp. stand biomass in Eurasia region // Ind. For. 2021a. V. 147. Iss. 3. P. 224–229.
- Usoltsev V. A., Shobairi O., Tsepordey I. S., Zukow W. Allometric models to predicate single-tree biomass in the Eurasian *Larix* spp. forest // Ecol. Quest. 2021b. V. 32. Iss. 1. P. 29–36.
- Vahey D. W., Zhu J. Y., Scott C. T. Wood density and anatomical properties in suppressed-growth trees: Comparison of two methods // Wood Fiber Sci. 2007. V. 39. Iss. 3. P. 462–471.
- Vaughan D., Auty D., Kolb T. E., Meador A. J. S., Mackes K. H., Dahlen J., Moser W. K. Climate has a larger effect than stand basal area on wood density in *Pinus ponderosa* var. *scopulorum* in the southwestern USA // Ann. For. Sci. 2019. V. 76. Iss. 3. P. 1–12.

- Vyskot M. Biomass of the tree layer of a spruce forest in the Bohemian Uplands. Praha: Academia, 1981. 397 p.
- Wiemann M. C., Williamson G. B. Geographic variation in wood specific gravity: Effects of latitude, temperature, and precipitation // Wood Fiber Sci. 2002. V. 34. Iss. 1. P. 96–107.
- Yang K.-C. Impact of spacing on juvenile wood and mature wood properties of white spruce (*Picea glauca*) // Taiwan Lin Ye Ke Xue. 2002. V. 17. Iss. 1. P. 13–29.
- Yang K. C., Hazenberg G. Impact of spacing on tracheid length, relative density, and growth rate of juvenile wood and mature wood in *Picea mariana* // Can. J. For. Res. 2011. V. 24. Iss. 5. P. 996–1007.
- Yeboah D., Burton A. J., Storer A. J., Opuni-Frimpong E. Variation in wood density and carbon content of tropical plantation tree species from Ghana // New For. 2014. V. 45. Iss. 1. P. 35–52.
- Zanne A. E., Lopez-Gonzalez G., Coomes D. A., Ilic J., Jansen S., Lewis S. L., Miller R. B., Swenson N. G., Wiemann M. C., Chave J. Global wood density database. Dryad, 2009. <http://hdl.handle.net/10255/dryad.235>
- Zeng W. S. Developing tree biomass models for eight major tree species in China // Biomass volume estimation and valorization for energy. Chapter 1. Intech Publ., 2017. P. 3–21.
- Zeng W. S., Zhang H. R., Tang S. Z. Using the dummy variable model approach to construct compatible single-tree biomass equations at different scales – a case study for Masson pine (*Pinus massoniana*) in southern China // Can. J. For. Res. 2011. V. 41. Iss. 7. P. 1547–1554.
- Zhang L., Shi H. Local modeling of tree growth by geographically weighted regression // For. Sci. 2003. V. 50. Iss. 2. P. 225–244.
- Zhu J. Y., Scott C. T., Scallon K. L., Myers G. C. Effects of plantation density on wood density and anatomical properties of red pine (*Pinus resinosa* Ait.) // Wood Fiber Sci. 2007. V. 39. Iss. 3. P. 502–512.

## GEOGRAPHICAL PATTERNS OF CHANGES IN THE BASIC DENSITY OF WOOD AND BARK OF FOREST-FORMING SPECIES OF EURASIA

V. A. Usoltsev<sup>1, 2</sup>, I. S. Tsepordey<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Botanical Garden, Russian Academy of Sciences, Ural Branch  
8 Marta str., 202a, Yekaterinburg, 620144 Russian Federation

<sup>2</sup> Ural State Forest Engineering University  
Sibirskii trakt, 37, Yekaterinburg, 620100 Russian Federation

E-mail: Usoltsev50@mail.ru, ivan.tsepordey@yandex.ru

Qualimetry of aboveground and underground biomass of trees is an integral part of studies of biological productivity and carbon depositing capacity of forest cover, necessary for the correct assessment of the carbon cycle in its spatial gradients and in relation to climate change. The great bulk of carbon is deposited in tree stems and largely depends on the basic density (BD) of wood and bark. The author's database on the qualimetry of forest-forming species of Northern Eurasia is used in the work. About 3.450 model trees of 9 tree species (genera) were selected from it. The constructed mixed-effects models describing the dependences of the BD of wood and bark on their dendrometric indicators, geographical coordinates and species belonging of trees, revealed a 0.25% decrease in the BD of wood by 1 ° N. in the direction from south to north and 0.26 % decrease by 1 ° E. in the direction from west to east. In the same gradients, the decrease in the BD of the stem bark is 0.55 % by 1 ° N. and 0.28 % by 1 ° E., respectively. The largest share of the explained variability of BD is accounted for by the species of trees – 74 % for wood and 87 % for bark, significantly less – by geographical location – 12 and 9 %, respectively, and the smallest share – by dendrometric indicators of trees 14 and 4 %, respectively. The ranking of species of equal-sized trees by BD value was performed, which showed that each species has a specific ratio of BD of wood and bark. This means that for a more correct assessment of the basic density and carbon deposition in wood and bark, it is necessary to process separately wood and bark of the disks removed from stems, and not the disks over bark as a whole.

**Keywords:** stem wood and bark, mixed-effects model, geographic latitude and longitude.

**How to cite:** Usoltsev V. A., Tsepordey I. S. Geographical patterns of changes in the basic density of wood and bark of forest-forming species of Eurasia // *Sibirskij Lesnoj Zhurnal* (Sib. J. For. Sci.). 2022. N. 3. P. 59–68 (in Russian with English abstract).

## CONTENTS

<i>A. A. Onuchin</i> Foreword From the Scientific Editor for Thematic Issue of the Siberian Journal of Forest Science .....	3
<b>RESEARCH ARTICLES</b>	
<i>A. A. Onuchin, A. E. Petrenko, D. S. Sobachkin, R. S. Sobachkin</i> Reaction of Young Pine Stands in Krasnoyarsk Forest-Steppe to Thinning and Application of Nitrogen Fertilizers .....	6
<i>A. A. Onuchin, D. S. Sobachkin, R. S. Sobachkin, A. E. Petrenko, V. V. Ivanov</i> Reaction of Middle-Aged Pine Stands in Krasnoyarsk Forest-Steppe to Nitrogen Fertilizers and Thinning .....	15
<i>L. S. Pshenichnikova, A. A. Onuchin, R. S. Sobachkin, A. E. Petrenko</i> The Growth Specifics of Pine Crops of Various Density in the Siberian Southern Taiga .....	24
<i>R. S. Sobachkin, D. S. Sobachkin, A. E. Petrenko</i> The Specifics of Growth and Productivity of Young Pine Stands, Formed of the Trees of the Different Cenotic Position .....	34
<i>A. N. Borisov, V. V. Ivanov</i> Simulation Modeling of the Growth of Pine Stands .....	40
<i>A. V. Lebedev, V. V. Kuzmichev</i> Stand Site Index Scale Development Using the Generalized Algebraic Difference Approach .....	48
<i>V. A. Usoltsev, I. S. Tsepordey</i> Geographical Patterns of Changes in the Basic Density of Wood and Bark of Forest-Forming Species of Eurasia .....	59

## СОДЕРЖАНИЕ

*А. А. Онучин*

Предисловие научного редактора тематического номера «Сибирского лесного журнала» ..... 3

### ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЕ СТАТЬИ

*А. А. Онучин, А. Е. Петренко, Д. С. Собачкин, Р. С. Собачкин*

Реакция сосновых молодняков Красноярской лесостепи на изреживание и внесение азотных удобрений ..... 6

*А. А. Онучин, Д. С. Собачкин, Р. С. Собачкин, А. Е. Петренко, В. В. Иванов*

Реакция средневозрастных сосняков Красноярской лесостепи на внесение азотных удобрений и изреживание ..... 15

*Л. С. Пишеничникова, А. А. Онучин, Р. С. Собачкин, А. Е. Петренко*

Особенности роста сосновых культур разной густоты в условиях южной тайги Сибири ..... 24

*Р. С. Собачкин, Д. С. Собачкин, А. Е. Петренко*

Особенности роста и продуктивности сосновых молодняков, сформированных из деревьев различного ценотического статуса ..... 34

*А. Н. Борисов, В. В. Иванов*

Имитационное моделирование роста сосновых древостоев ..... 40

*А. В. Лебедев, В. В. Кузьмичев*

Построение бонитетной шкалы с использованием обобщенного алгебраического разностного подхода ..... 48

*В. А. Усольцев, И. С. Цепордей*

Географические закономерности изменения базисной плотности древесины и коры лесообразующих пород Евразии ..... 59