

На правах рукописи

**БАЛАКИН ДМИТРИЙ СЕРГЕЕВИЧ**

**ФОРМИРОВАНИЕ, РОСТ И ПРОДУКТИВНОСТЬ ДРЕВОСТОЕВ НА  
ВЕРХНЕМ ПРЕДЕЛЕ ИХ ПРОИЗРАСТАНИЯ В ГОРАХ ЮЖНОГО  
УРАЛА В УСЛОВИЯХ СОВРЕМЕННОГО ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА**

4.1.6 – Лесоведение, лесоводство, лесные культуры,  
агролесомелиорация, озеленение, лесная пирология и таксация

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата сельскохозяйственных наук

Екатеринбург, 2026

Работа выполнена  
в ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет»

Научный руководитель:	доктор сельскохозяйственных наук, профессор Нагимов Зуфар Ягфарович
Официальные оппоненты:	Кутявин Иван Николаевич, доктор биологических наук, Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук - обособленное подразделение ФГБУН Федеральный исследовательский центр «Коми научный центр Уральского отделения Российской академии наук», отдел лесобиологических проблем Севера, старший научный сотрудник;  Цепордей Иван Степанович, кандидат сельскохозяйственных наук, ФГБУН Ботанический сад Уральского отделения Российской академии наук, лаборатория популяционной биологии древесных растений и динамики леса, старший научный сотрудник.
Ведущая организация:	ФГБОУ ВО «Башкирский государственный аграрный университет»

Защита состоится 29 мая 2026 г. в 12<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета 24.2.424.02 при ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет» по адресу: 620100, г. Екатеринбург, ул. Сибирский тракт, 37, ауд. 401.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет» ([www.usfeu.ru](http://www.usfeu.ru)).

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

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
канд. с.-х. наук, доцент

Магасумова  
Альфия Гаптрауфовна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** В последние годы в разных районах страны получены достоверные сведения об экспансии древесно-кустарниковой растительности в горные тундры и повышении верхней границы леса, которые вызваны продолжающимся потеплением климата планеты и улучшением в высокогорьях условий для лесовозобновления (Шиятов, 2009; Моисеев, 2011; Фомин, 2011; и др.). С подъемом верхней границы леса в горных районах заметно расширяются территории, занятые лесными насаждениями. Сформировавшиеся в этих условиях древостои в настоящее время на количественном уровне недостаточно изучены. В тоже время сведения о их формировании, особенностях роста и продуктивности чрезвычайно важны и, в первую очередь, для оценки экосистемных функций этих насаждений. В частности, сформировавшиеся за последние десятилетия в горной тундре древостои, безусловно, выступают поглотителем углерода. Однако, их углерод депонирующая роль в настоящее время остается не до оцененной. Практически отсутствуют данные длительных наблюдений о росте и продуктивности древостоев в высокогорных условиях, полученные на постоянных пробных площадях.

Работа выполнена при поддержке госбюджетной темы FEUG-2023-0002.

**Степень разработанности темы.** В настоящее время на горных массивах различных регионов получены сведения о лесовозобновлении и факторах, влияющих на этот процесс, повышении верхней границы леса, морфогенезе и жизненных формах растений, климатогенной динамике и структуре древесной растительности на верхнем пределе ее произрастания, особенностях формирования и строения древостоев (Горчаковский, Шиятов, 1985; Моисеев, 2002, 2011; Holtmeier, 2003; Горяева, 2008; Дэви, 2008; Фомин, 2009, 2011; Шиятов, 2009; Григорьев и др., 2012; Hagedorn et al., 2020; Вьюхин, 2025; и др.). Исследования роста, продуктивности и углерод депонирующей способности древостоев в условиях высокогорий носят фрагментарный характер.

Выполненное исследование является продолжением работ по изучению климатогенной динамики древесной растительности в экотоне верхней границы леса на склонах горного массива Ирмель (Бабенко и др., 2008).

Диссертация является законченным научным исследованием.

**Цель исследования** – оценка по материалам 20-летних наблюдений на постоянных пробных площадях возрастной структуры, роста, продуктивности и углерод депонирующей способности древостоев на верхнем пределе их произрастания на одном из самых больших горных массивов Южного Урала.

**Задачи исследований.** Для достижения данной цели были поставлены следующие задачи:

1. Изучить возрастную структуру древостоев, сформировавшихся в условиях современных изменений климата на верхнем пределе их произрастания.
2. Исследовать зависимости диаметра и высоты деревьев от их возраста в разновозрастных древостоях в зависимости от их высотного положения.
3. Произвести ретроспективный анализ изменения таксационной характеристики древостоев, произрастающих на разных высотных уровнях.
4. Изучить зависимости между фракциями надземной фитомассы и размерными показателями деревьев.
5. Определить запасы надземной фитомассы по фракциям и депонированного углерода в древостоях и их текущие и средние изменения в зависимости от высоты над уровнем моря.

**Научная новизна.** Впервые по материалам многолетних исследований в высоко-

горях Южного Урала выполнен ретроспективный анализ формирования, структуры, роста и продуктивности древостоев на верхнем пределе их произрастания. Выявлены особенности распределения деревьев по возрасту и возрастная структура древостоев. Установлены закономерности изменения таксационных показателей древостоев ели и березы, занимающих разное высотное положение, за 20-летний период. Определены запасы надземной фитомассы древостоев и их средние изменения при продвижении вверх по высотному градиенту. Оценена углерод депонирующая способность древостоев ели и березы, произрастающих на разных высотных уровнях.

**Теоретическая и практическая значимость работы.** Результаты исследований, полученные на стационарном объекте, вносят значительный вклад в развитие научных знаний о закономерностях формирования, роста и продуктивности насаждений в высокогорных экосистемах Урала в условиях современных изменений климата. Они могут быть использованы в качестве информационной, экспериментальной, методической и теоретической основы при проведении научно-исследовательских и лесоучетных работ, оценке пространственно-временной динамики древесной растительности и определении бюджета углерода в лесах региона.

**Методология и методы исследования.** Методология основывается на комплексных и многоаспектных принципах оценки древостоев, экспериментальных разработках и теоретических обобщениях результатов исследований высокогорных экосистем. В процессе выполнения работы использовались общепринятые в лесоводстве, лесной таксации и математической статистике методы. Экспериментальный материал собран на заложенном в 2002 году по методике международного проекта ИНТАС-01-0052 высотном профиле.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Изменения климата на Южном Урале способствуют подъему верхней границы леса; растянутость во времени и пульсирующий характер лесовозобновления, обусловленные в высокогорьях экстремальными условиями для размножения и произрастания древесных растений, приводят к формированию циклично - и ступенчато-разновозрастных древостоев, состоящих из нескольких морфологически невыраженных поколений леса.

2. Таксационные показатели древостоев в высокогорьях обусловлены их высотным положением; за 20-летний период наиболее заметные изменения в таксационной характеристике древостоев произошли в редколесьях, которые к настоящему времени трансформировались в сомкнутые насаждения.

3. С увеличением высоты над уровнем моря запасы надземной фитомассы древостоев и депонированного углерода закономерно снижаются, в тоже время интенсивность накопления фитомассы и депонирования углерода в течение последних 20 лет заметно повышается

**Достоверность и обоснованность результатов исследования** обеспечена и подтверждена анализом достаточного объема эмпирических данных, полученных с четким соблюдением положений использованных методик на стационарном объекте, применением обоснованных и корректных математико-статистических методов анализа и оценки достоверности результатов. Выявленные в работе количественные закономерности статистически значимы и достоверны.

**Апробация результатов.** Основные результаты исследований докладывались на XVII Всероссийской (национальной) научно-технической конференции студентов и аспирантов «Научное творчество молодежи – лесному комплексу России» (Екатеринбург, 2021), IV Всероссийской научной конференции «Биоразнообразие экосистем Крайнего

Севера: инвентаризация, мониторинг, охрана» (Сыктывкар, 2023), IX Всероссийской конференции с международным участием, посвященной 300-летию Российской академии наук, 35-летию научной школы чл.-корр. РАН А. К. Темботова, 30-летию Института экологии горных территорий им. А.К. Темботова РАН горные экосистемы и их компоненты (Нальчик, 2024); Международной научно – практической конференции, посвященной 110-летию кафедры лесоводства, лесной таксации и лесоустройства, к 95-летию ВГЛУ «Лесные экосистемы в условиях меняющегося климата: проблемы и перспективы» (Воронеж, 2025).

**Личный вклад автора.** При непосредственном участии автора произведена постановка цели и задач исследования, разработана программа и обоснована методика работ, организованы экспедиционные работы, собран экспериментальный материал. Автором лично выполнены математико-статистическая обработка фактических материалов, анализ, обобщение и интерпретация полученных результатов

**Публикации.** Основные материалы по теме научного исследования опубликованы в 15 научных работах, в том числе 11 работ в журналах, рекомендуемых ВАК РФ, и журналах, индексируемых в международных базах научного цитирования Web of Science и Scopus.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация изложена на 177 страницах и включает в себя введение, шесть глав и заключение. Библиографическое описание включает в себя 254 источника, в том числе 25 на иностранных языках. Текст диссертации проиллюстрирован 21 рисунком и 21 таблицей.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

### **1. ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ЮЖНОГО УРАЛА**

Исследования проводились на горном массиве Ирмель, расположенном в районе наиболее высоких центральных возвышенностей Южного Урала. Он характеризуется значительными абсолютными высотами (до 1600 м над уровнем моря) и сложной морфологической структурой. В главе на основе литературных источников (Алисов, 1956; Прокаев, 1959; Цветаев, 1960; Колесников, 1961; Погодина, Розов, 1968; Колесников и др., 1973; Фирсова, 1977; Горчаковский, 1989; Бабенко и др., 2008; и др.) приведено описание геоморфологии, климата, почв и растительности района.

### **2. СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ**

#### **2.1. Современные изменения климата и их последствия в горных экосистемах**

На современном этапе одной из наиболее глобальных экологических и социально-экономических проблем признается изменение климата, и важная роль в стабилизации климатических факторов отводится лесам, как поглотителям углекислого газа (Киотский протокол..., 1997; Изменение климата..., 2001). Лесные экосистемы рассматриваются как биологический барьер угрозам глобального изменения климата (Курбанов, 2002; Замолодчиков и др., 2008; Леринк и др., 2020; Усольцев и др., 2021; и др.). В свою очередь с изменением климатических условий наблюдается трансформация лесных сообществ. Изучению их реакции на современные изменения климата посвящено большое количество работ, в том числе в высокогорных районах, в которых климатически обусловленная динамика растительности проявляется наиболее отчетливо (Горчаковский, Шиятов, 1985; Моисеев, 2002, 2011; Holtmeier, 2003; Нагимов и др., 2007, 2008, 2025; Горяева, 2008; Дэви, 2008; Фомин, 2009, 2011; Шиятов, 2009; Григорьев и др., 2012; Nagedorn et al., 2020; Вьюхин, 2025; и др.). Исследования, проведенные в высокогорьях,

свидетельствуют о смещении верхней границы леса выше в горы в результате улучшения климатических условий.

## **2.2. Основные направления и методы изучения структуры, роста и продуктивности древостоев**

Особенности структуры, роста и продуктивности древостоев в различных лесорастительных условиях и методы их оценки освещены в работах многих отечественных и зарубежных исследователей (Орлов, 1925; Тюрин, 1931; Лебков, 1965; Никитин, 1966; Грейг-Смит, 1967; Свалов, 1975; Верхунов, 1976; Кузьмичев, 1977, 2013; Разин, 1977; Гусев, 1978; Загреев, 1978; Лосицкий, Чуенков, 1980; Анучин, 1982; Грибанов, 1986; Загреев и др., 1992; Луганский, Нагимов, 1994; Казимиров, 1995; Нагимов, 2000; Черных, 2002; Нагимов и др., 2003; Шевелев, Кузьмичев, 2003; Колтунова, 2004; Верхунов, Черных, 2009; Маленко, 2012; Онучин, 2017; Ефремова, 2018; Кутявин, 2018, 2024; Кулакова, 2019; и др.). В главе дан анализ различных направлений исследований роста и продуктивности древостоев. Отмечается, что такие исследования на верхнем пределе произрастания древостоев носят фрагментарный характер (Бабенко, 2006; Григорьев и др., 2012; Гайсин, 2022).

## **2.3. Основные этапы и методы изучения фитомассы деревьев и древостоев**

На протяжении многих лет оценка фитомассы деревьев и древостоев являлась составной частью физиологических, лесоводственных и ресурсоведческих исследований (Burger, 1937, 1948; Молчанов, 1961; Смирнов, 1961; Assmann, 1961; Поздняков, 1970; Уткин, 1970; Иванчиков, 1971; Семечкина, 1978; Онучин, Борисов, 1984; Гордина, 1985; Усольцев, 1985, 1988; Аткин, 1994; Луганский, Нагимов, 1994; и др.). Современный этап исследований фитомассы и первичной продукции лесных экосистем, начавшийся после Конференции ООН по окружающей среде и развитию (1992) и подписания Киотского протокола (1997), в основном ориентирован на задачи оценки и прогнозирования углерод депонирующего потенциала лесов (Birdsey, 1992; Стаканов и др., 1994; Швиденко, Нильсон, 1997; Бобкова, Тужилкина, 2001; Курбанов, 2002; Korner, 2003; Бакаева, Замолодчиков, 2008; Вараксин и др., 2008; Замолодчиков и др., 2008; Терехов, Усольцев, 2008; Швиденко, Щепашенко, 2014; Цепордей, 2019; Леринк, 2020; Hagedorn et. al., 2020; Усольцев и др., 2021; Кутявин, 2024; Дергунов, 2025; Нагимов и др., 2025; и др.).

Экспансия древесной растительности в горные тундры, обусловленная потеплением климата, свидетельствует о расширении в горных районах площадей, занятых лесными насаждениями, выступающими поглотителями углерода. В этой связи несомненный интерес представляют работы по оценке фитомассы древостоев, сформировавшихся на ранее безлесных территориях высокогорий. В настоящее время в разных регионах страны такие исследования выполняются (Богословская, 2005; Кноре и др., 2006; Григорьев и др., 2012; Гайсин, 2022; Нагимов и др., 2025; и др.), однако их количество явно недостаточно для формулирования обобщающих выводов.

## **3. ПРОГРАММА, ОБЪЕКТ, МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ И ОБЪЕМ ВЫПОЛНЕННЫХ РАБОТ**

### **3.1. Программа исследований**

Программа исследований разработана в соответствии с поставленными задачами и направлена для достижения основной цели работы.

### 3.2. Объект исследований

Объектом исследований являлись древостои, произрастающие на верхнем пределе их произрастания на склонах горы Малый Ирмель (Южный Урал). В их составе в основном представлена ель сибирская (*Picea obovata* Ledeb) и в небольшом количестве – береза повислая (*Betula pendula* Roth). Исследованиями охвачены древостои, произрастающие в экотоне верхней границы древесной растительности (ЭВГДР), а также сомкнутые древостои, произрастающие ниже этого экотона. П.Л. Горчаковский и С.Г. Шиятов (1985) ЭВГДР на основе сомкнутости полога подразделяют на три полосы: отдельных деревьев, занимающую в экотоне верхнее положение; редины с сомкнутостью полога менее 0,1 и занимающую среднее положение и редколесий с сомкнутостью полога от 0,1 до 0,3 и занимающую нижнее положение.

### 3.3. Методика исследований

В основу исследований положена методика международного проекта INTAS-01-0052. При выполнении данного проекта в 2002 году на юго-западном склоне горы Малый Ирмель был заложен высотный профиль в направлении от сомкнутых лесов к горной тундре. На данном профиле зафиксированы семь высотных уровней, отличающиеся абсолютной высотой и характеристиками произрастающей древесной растительности. Нижние уровни (с четвертого по седьмой) были представлены сомкнутыми (сплошными) насаждениями, второй и третий – редколесьем, а первый – рединой.

На высотных уровнях закладывались переносные площадки размером 400 м<sup>2</sup> каждая на одинаковом удалении друг от друга в количестве от 3 до 6. На них для каждого дерева высотой более 1,5 м устанавливались следующие характеристики: номер, порода, местоположение, происхождение, жизненная форма, высота, диаметр на высоте груди, диаметр и протяженность кроны. Для определения возраста у деревьев диаметром более 3 см извлекался буровой образец древесины (керна), а у усохших и более тонких выпиливался диск у основания ствола. Подсчет и датировка годовых слоев на дисках и кернах производился на измерительном комплексе Lintab 5 с программной поддержкой TSAP. Отбор и обработка модельных деревьев на изучение надземной фитомассы осуществлялись в соответствии с методическими рекомендациями В.А. Усольцева и З.Я. Нагимова (1988).

Таксационные характеристики модельных деревьев и древостоев устанавливались общепринятыми в лесной таксации способами. Надземная фитомасса древостоев определялась регрессионным методом (Усольцев, Нагимов, 1988) на основе зависимостей между размерными и весовыми показателями деревьев. Статистический анализ полученных данных и изучение зависимостей между таксационными признаками деревьев и древостоев выполнялись с использованием пакетов прикладных программ Microsoft Excel 2016 и Statistica 10.0.

### 3.4. Объем выполненных работ по теме диссертации

Экспериментальный материал, использованный при подготовке и написании диссертации, получен в ходе многолетних комплексных исследований высокогорных лесных и лесотундровых сообществ. Автор диссертации принимал активное участие в данных исследованиях в 2020 - 2025 годах.

Для решения поставленных в диссертации задач использовались материалы, собранные в 2002, 2012 и 2022 годах на трех высотных уровнях:

- первом – расположенном в полосе редины на высоте 1360 м над уровнем моря;
- втором – расположенном в редколесьях на высоте 1310 м над уровнем моря;
- пятом – расположенном в сомкнутом лесу на высоте 1260 м над уровнем моря.

## **4. ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ И ВОЗРАСТНАЯ СТРУКТУРА ДРЕВОСТОЕВ НА ВЕРХНЕМ ПРЕДЕЛЕ ИХ ПРОИЗРАСТАНИЯ**

### **4.1. Особенности формирования древостоев**

Установление возраста всех деревьев (ели и березы) с последующей перекрестной датировкой, позволяет достаточно надежно выявить особенности формирования древостоев на разных высотных уровнях в ретроспективе, в частности, установить начало заселения древесной растительностью высотных уровней, выделить периоды интенсивного лесовозобновления, его состав (Григорьев и др., 2012; Вьюхин, 2025).

Результаты исследований свидетельствуют, что начало лесовозобновительного процесса, определяемое по возрасту ныне растущих деревьев, тесно связано с высотой над уровнем моря. С поднятием в гору оно сдвигается на более поздние периоды: на пятом уровне начало процесса датируется 1875 годом, а на первом и втором – 1920 годом. Приведенные данные свидетельствуют о продвижении верхней границы леса выше в горы. Это связано с улучшением климатической обстановки в течение последнего столетия. Как отмечалось выше, основной породой на исследуемом профиле является ель. Она в настоящее время доминирует на всех высотных уровнях и нет основания полагать, что уступит свои позиции в перспективе.

Лесовозобновительный процесс на всех трех высотных уровнях существенно растянут во времени (на 80-120 лет). Причем его интенсивность в разные периоды времени может быть различной. Обнаруживаются периоды как с высокими показателями возобновления, так и с низкими и даже с его отсутствием. Это связано с тем, что несмотря на существенное улучшение климатических показателей, условия для появления, роста и развития молодого поколения леса в высокогорьях остаются чрезвычайно сложными. Растянута лесовозобновления во времени сокращается с увеличением высоты над уровнем моря, а его последние этапы на всех высотных уровнях профиля характеризуются появлением исключительно ели. Причем в последние 2-3 десятилетия лесовозобновление на первом и втором высотном уровнях протекало активно, а на пятом – отсутствует. Отсутствие возобновления этой породы на пятом уровне в последние 50 лет, объясняется высокой полнотой уже сформировавшихся здесь древостоев.

Растянута во времени и пульсирующий характер лесовозобновления обусловлены экстремальными экологическими и лесорастительными условиями высокогорий. Многие исследователи (Барыш, 2008; Горяева, 2008; Кошкина, 2008; Григорьев и др., 2012; Вьюхин, 2025) отмечают, что в ЭВГДР всходы могут появиться и выжить в достаточном количестве только при благоприятном сочетании климатических условий после семенных годов. Это обстоятельство растягивает лесовозобновительный процесс в ЭВГДР на долгие годы.

### **4.2. Возрастная структура древостоев**

Объективное представление о возрастной структуре древостоев можно получить на основе анализа материалов математико-статистической обработки рядов распределения деревьев по возрасту (табл. 1). Данные табл. 1 свидетельствуют, что за 20-летний период на первом и втором уровнях у ели в связи с продолжающимся лесовозобновлением и появлением новых, молодых поколений деревьев, диапазон варьирования возраста увеличивается, а среднее значение этого показателя практически не изменяется. На пятом уровне, на котором появление новых деревьев закончилось еще в середине 70-х годов прошлого столетия в результате достижения древостоями высокой сомкнутости и полноты, наоборот, этот диапазон уменьшается, а средний возраст увеличивается на 19 лет (на величину исследуемого периода).

Таблица 1 – Статистические параметры распределения деревьев ели и березы по возрасту на высотных уровнях исследуемого профиля

Статистические показатели	Год таксации	Ель			Берёза		
		Высотные уровни					
		первый	второй	пятый	первый	второй	пятый
Диапазон изменения возраста, лет	2002	43	43	114	39	39	46
	2012	57	88	114	46	35	40
	2022	67	87	98	56	35	40
Среднее значение, лет	2002	44	44	79	60	60	87
	2012	47	38	87	60	45	109
	2022	49	44	98	70	53	117
Ошибка среднего, лет	2002	4,4	4,4	2,1	6,5	6,5	13,3
	2012	4,8	2,6	2,4	4,4	2,0	7,3
	2022	5,1	2,6	2,5	4,1	2,0	7,3
Показатель эксцесса	2002	-1,06	-1,14	-0,94	-1,72	-1,7	2,09
	2012	-0,95	1,10	-1,12	0,53	1,85	0,37
	2022	-1,16	1,20	-1,04	0,61	1,90	0,37
Показатель асимметрии	2002	0,01	0,00	0,00	0,45	0,50	-1,51
	2012	0,16	1,30	0,07	0,69	1,40	-1,03
	2022	0,01	1,25	0,15	0,43	1,40	-1,03
Коэффициент вариации, %	2002	31,4	31,6	32,9	26,6	26,6	37,3
	2012	37,1	55,0	31,9	26,4	20,8	15,0
	2022	42,4	45,4	25,7	24,8	17,6	14,0
Точность опыта, %	2002	9,9	9,9	2,7	10,8	10,8	15,2
	2012	10,3	6,8	2,8	7,3	4,4	6,7
	2022	10,3	5,9	2,5	5,8	3,8	6,2

С повышением высотной позиции древостоев изменяется их средний возраст: наименьшие значения этого показателя наблюдаются на втором уровне, а наибольшие – на пятом. Такой характер изменения этого показателя связан с различиями высотных уровней по началу лесообразовательного процесса и по интенсивности возобновления в последние десятилетия. Так, некоторое превосходство березы над елью по среднему возрасту объясняется тем, что на всех высотных уровнях профиля последние этапы лесовозобновления, как было отмечено выше, характеризуются появлением только ели.

Исследуемые древостои всех высотных уровней во все учетные годы характеризуются высокой вариацией возраста деревьев. Уровень изменчивости по шкале С.А. Мамаева (1973) идентифицируется в трех случаях как очень высокий в шести как высокий, еще в шести – как повышенный и в трех – как средний. При прочих равных условиях (близких таксационных характеристиках) ельники в исследуемом экотоне характеризуются большей дифференциацией деревьев по возрасту и большей амплитудой разновозрастности, чем в равнинных лесах (Гусев, 1977; Шавнин, 1990). Причем варьирование возраста деревьев теневыносливой ели заметно выше, чем возраста деревьев светолюбивой березы.

Высотные уровни, характеризующиеся повышением интенсивности лесовозобновления в последние десятилетия (редколесья и редины), в которых наблюдается естественное расширение диапазона изменения возраста деревьев и усложнение возрастной структуры древостоев, отличаются большей дифференциацией деревьев по возрасту, а ряды распределения возраста на этих уровнях характеризуются резко выраженной по-

ложительной асимметрией и положительным эксцессом. В нижерасположенном со-  
мкнутом насаждении указанные ряды отличаются не существенной асимметрией (близ-  
кой к 0) и отрицательным эксцессом.

На исследуемом профиле, в соответствии со схемой типов возрастной структуры  
древостоев Г.Е. Комина и И.В. Семечкина (Комин, Семечкин, 1970, Комин, 1973), име-  
ют распространение циклично- и ступенчато-разновозрастные насаждения, сложенные  
из нескольких морфологически невыраженных поколений леса. Причем насаждения на  
пятом высотном уровне можно отнести к циклично-разновозрастным, а на первом и  
втором – к ступенчато-разновозрастным.

В целом, вслед за исследователями высокогорных лесов в других районах страны  
можно сделать вывод, что разновозрастность лесонасаждений в ЭВГДР следует рас-  
сматривать как фактор их выживаемости и устойчивости в экстремальных для роста  
растений условиях среды.

## 5. ДИНАМИКА РОСТА И ПРОДУКТИВНОСТИ ДРЕВОСТОЕВ

### 5.1. Возрастная динамика высоты и диаметра деревьев ели и березы

В специальной литературе отмечается (Григорьев и др., 2012; Вьюхин, 2025), что  
в разновозрастных насаждениях высокогорий при лесочетных работах наиболее обос-  
нованной является синтетическая оценка древостоев в пределах объективно выделяе-  
мых в ЭВГДР поясов древесной растительности (редин, редколесий). Причем в таких  
древостоях определение у всех деревьев помимо размерных показателей их возраста,  
позволяет корректно оценить возрастную динамику высоты и диаметра.

Для описания хода роста исследуемых древостоев по высоте и диаметру исполь-  
зовались функции Митчерлиха и Корсуна, которые относятся к S-образным кривым,  
выражающим большой период роста – от возникновения растений до их отмирания  
(Кузьмичев, 1977, 2013). Из этих двух функций лучшей признавалась та, которая в  
большей степени соответствовала фактическим данным и характеризовалась более вы-  
соким коэффициентом детерминации ( $R^2$ ). Разработанные уравнения зависимости высо-  
ты и диаметра деревьев ели и березы от их возраста приведены в табл. 2.

Таблица 2 – Уравнения зависимости высоты и диаметра деревьев ели и березы от  
их возраста

Высотный уровень	Таксационный показатель	Параметры уравнений	$R^2$	Номер уравнения
Ель				
Первый	высота	$H = 5,3 * (1 - \text{EXP}(-0,03350 * A))^{1,7623}$	0,777	(5.1)
	диаметр	$D = A^2 / (233,3724 - 1,9195 * A + 0,04199 * A^2)$	0,872	(5.2)
Второй	высота	$H = 7,1 * (1 - \text{EXP}(-0,02312 * A))^{1,3830}$	0,707	(5.3)
	диаметр	$D = 24 * (1 - \text{EXP}(-0,02677 * A))^{2,1196}$	0,739	(5.4)
Пятый	высота	$H = 15,9 * (1 - \text{EXP}(-0,01590 * A))^{1,7482}$	0,890	(5.5)
	диаметр	$D = 38,0 * (1 - \text{EXP}(-0,01962 * A))^{2,9662}$	0,790	(5.6)
Береза				
Первый	высота	$H = 3,5 * (1 - \text{EXP}(-0,02304 * A))^{1,5670}$	0,772	(5.7)
	диаметр	$D = 5,0 * (1 - \text{EXP}(-0,03557 * A))^{3,3069}$	0,633	(5.8)
Второй	высота	$H = 9,3 * (1 - \text{EXP}(-0,03135 * A))^{2,4184}$	0,639	(5.9)
	диаметр	$D = 14,8 * (1 - \text{EXP}(-0,0628 * A))^{11,6340}$	0,794	(5.10)
Пятый	высота	$H = 13,0 * (1 - \text{EXP}(-0,01978 * A))^{1,8347}$	0,782	(5.11)
	диаметр	$D = 32,0 * (1 - \text{EXP}(-0,02884 * A))^{8,6857}$	0,778	(5.12)

В подавляющем большинстве случаев лучшей для выражения зависимостей высоты и диаметра деревьев ели и березы от возраста является функция Митчерлиха. Значения коэффициентов детерминации свидетельствуют, что все разработанные уравнения адекватны экспериментальным материалам. Есть все основания полагать, что они корректно передают особенности роста деревьев по высоте и диаметру. Об этом, в частности, можно судить и по величине показателя степени в функции Митчерлиха. Во всех случаях этот показатель больше 1,0, то есть выражаемые уравнениями кривые роста имеют точку перегиба в области положительных значений, что соответствует биологии древесных растений (Кузьмичев, 2013).

С использованием разработанных уравнений (5.1)–(5.12) составлены таблицы возрастной динамики высоты и диаметра деревьев ели и березы. Их фрагмент по ели приведен ниже (табл. 3).

Таблица 3 – Возрастная динамика высоты и диаметра деревьев ели

Возраст, лет	Высота, м			Средний прирост по высоте, см			Диаметр, см			Средний прирост по диаметру, см		
	Высотные уровни											
	1	2	5	1	2	5	1	2	5	1	2	5
20	1,50	1,80	1,64				1,9	3,8	1,4			
30	2,37	2,72	2,92	8,7	9,2	12,8	4,2	6,8	3,4	0,2	0,3	0,2
40	3,10	3,53	4,26	7,3	8,1	13,4	7,1	9,9	6,2	0,3	0,3	0,3
60	4,11	4,77	6,79	5,1	6,2	12,7	13,4	14,9	12,7	0,3	0,3	0,3
80	4,68	5,60	8,95	2,9	4,2	10,8	18,3	18,4	19,0	0,2	0,2	0,3
100	4,98	6,15	10,67	1,5	2,8	8,6	21,6	20,7	24,3	0,2	0,1	0,3
120		6,49	12,01		1,7	6,7		22,0	28,3		0,1	0,2
140			13,02			5,1			31,2			0,1
160			13,78			3,8			33,3			0,1

Материалы данных исследований свидетельствуют, что ход роста по высоте и диаметру специфичен для каждой породы. У древостоев одной и той же породы он существенно отличается по высотным уровням профиля. При одинаковом возрасте средняя высота ели закономерно повышаются с понижением высоты над уровнем моря. Имеющиеся незначительные отклонения от этой закономерности наблюдаются только у молодом возрасте (до 30 лет) и, видимо, связаны с особенностями выборки.

Наибольшими значениями среднего диаметра до 70-летнего возраста характеризуются ельники на втором высотном уровне. После 70 лет преимущество по этому показателю переходит к древостоям пятого уровня. Отставание древостоев пятого уровня от древостоев второго и даже первого уровней в более молодом возрасте, объясняется сдерживающим влиянием густоты сомкнутого насаждения на рост деревьев по диаметру. Таким образом, можно сделать предположение, что влияние на интенсивность роста деревьев по диаметру ухудшения лесорастительных условий по мере продвижения в гору в значительной мере компенсируется снижением густоты древостоев в этом направлении.

Изменения хода роста по высоте и диаметру березовых древостоев, обусловленные высотой над уровнем моря, имеют тенденции, характерные для древостоев ели. На первом высотном уровне, характеризующимся наиболее жесткими лесорастительными

условиями (в первую очередь температурным режимом воздуха и почвы), менее зимостойкая и морозостойчивая береза растет намного хуже, чем ель.

## 5.2. Изменение таксационных показателей древостоев за 20-летний период

Данные таксации древостоев в 2002, 2012 и 2022 годах позволяют провести ретроспективный анализ их роста и продуктивности. При этом запас древостоев каждой породы на пробных площадях определялся на основе данных перечета деревьев и срубленных модельных деревьев по способу видовых высот:

$$M = \Sigma G * HF, \quad (5.13)$$

где  $M$  – запас древостоя,  $m^3$ ;

$\Sigma G$  – сумма площадей поперечных сечений деревьев древостоя,  $m^2$ ;

$HF$  – видовая высота древостоя, м.

Причем, для каждой породы видовая высота определялась по данным модельных деревьев на основе зависимостей их видовой высоты от высоты ( $H$ ), а не по нормативным таблицам, как это принято в лесотаксационной практике. Установлено, что эти зависимости имеют прямолинейный характер. На основе наших экспериментальных данных получены следующие регрессионные уравнения:

$$\text{по ели } HF = 0,3811 * H + 1,489 \quad R^2 = 0,967 \quad (5.14)$$

$$\text{по березе } HF = 0,4199 * H + 0,516 \quad R^2 = 0,963 \quad (5.15)$$

Высокие коэффициенты детерминации в уравнениях (5.14)-(5.15) свидетельствуют о том, что изменчивость видовой высоты деревьев и ели и березы практически полностью объясняется варьированием их высоты, а уравнения адекватны фактическим данным. По ним рассчитывались видовые высоты по значениям средних высот древостоев, определенных на разных высотных уровнях в разные учетные годы.

Таксационные показатели древостоев, установленные в соответствии с общепринятыми в лесной таксации методами, в разрезе высотных уровней и учетных годов представлены в табл. 4. Приведенные в ней материалы позволяют провести анализ роста исследуемых древостоев по двум направлениям:

- по каждому учетному году в зависимости от высоты над уровнем моря;
- на каждом высотном уровне в ретроспективе – за период с 2002 по 2022 годы.

Таблица 4 – Изменение таксационных показателей древостоев на разных высотных уровнях за 20-летний период

Год таксации	Характеристики яруса			Характеристики древесных пород					
	состав	полнота	$M, m^3$	порода	$A_{ср}, лет$	$H_{ср}, м$	$D_{ср}, см$	$\Sigma G, m^2$	$M, m^3$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2002	Первый уровень								
	8,5Е1,5Б	0,05	1,3	Е	44	3,4	8,4	0,38	1,1
				Б	60	2,2	3,3	0,13	0,2
	Второй уровень								
	9,0Е1,0Б	0,28	8,1	Е	44	3,4	9,3	2,61	7,3
				Б	60	3,5	3,9	0,39	0,8
Пятый уровень									
9,6Е0,4Б	1,30	127,8	Е	79	8,8	18,7	25,34	122,7	
			Б	87	9,1	15,4	1,17	5,1	
2012	Первый уровень								
	8,2Е1,8Б	0,11	2,8	Е	47	3,5	9,4	0,81	2,3
				Б	60	2,2	3,3	0,34	0,5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2012	Второй уровень								
	8,4Е1,6Б	0,57	18,3	Е	38	3,5	9,9	5,46	15,4
				Б	45	4,7	7,2	1,18	2,9
	Пятый уровень								
	9,4Е0,6Б	1,44	158,7	Е	87	9,6	21,0	29,07	149,6
				Б	109	10,4	21,9	1,86	9,1
2022	Первый уровень								
	7,8Е2,2Б	0,15	4,1	Е	49	3,7	10,3	1,09	3,2
				Б	70	2,5	3,7	0,58	0,9
	Второй уровень								
	7,9Е2,1Б	0,79	31,1	Е	44	4,0	11,8	8,18	24,7
				Б	53	5,6	9,6	2,23	6,4
	Пятый уровень								
	9,2Е0,8Б	1,45	179,5	Е	98	10,5	23,8	30,17	165,7
Б				117	10,7	23,7	2,76	13,8	

Примечание: в табл. 4  $A_{\text{ср}}$  - средний возраст;  $H_{\text{ср}}$  - средняя высота;  $D_{\text{ср}}$  - средний диаметр;  $\Sigma G$  - сумма площадей поперечных сечений;  $M$  - запас.

Исследуемые древостои характеризуются низкой производительностью (Va классом бонитета). Выявляется, что с повышением высоты над уровнем моря закономерно снижаются средняя высота, средний диаметр, абсолютная и относительная полнота и запас древостоев и ели и березы. Особенности изменения среднего возраста этих пород в зависимости от высотного положения древостоев отмечались выше.

Уменьшение полноты и запаса древостоев по мере продвижения в гору объясняется как уменьшением размеров деревьев в этом направлении, так и сокращением их количества на единице площади. Древостои на первом и втором уровнях характеризуются практически одинаковым составом. На пятом уровне доля участия березы в составе заметно ниже, чем на вышележащих уровнях. Это объясняется очень малым количеством деревьев этой породы на пятом уровне. Появление новых деревьев березы здесь закончилось еще в середине прошлого столетия и связано это с неблагоприятными условиями для возобновления светолюбивой березы под пологом сомкнутого древостоя.

За период с 2002 по 2022 годы наиболее заметные изменения в таксационной характеристике древостоев произошли на втором уровне (в бывшем редколесье). Здесь основные таксационные показатели древостоев повысились в относительном выражении на большую величину, чем на первом и пятом уровнях. По сравнению со вторым уровнем низкие темпы прироста показателей древостоев на первом уровне в основном обусловлены более жесткими экологическими условиями, а на пятом – высоким средним возрастом древостоев.

На первом и пятом уровнях приросты по запасу во второй половине исследуемого периода (с 2012 по 2022 г.г.) ниже, чем в первой половине (с 2002 по 2012 г.г.). На втором уровне наблюдается обратная картина. Этот факт свидетельствует, что в последние годы темпы прироста по запасу древостоев на втором уровне заметно выше, чем на первом и пятом.

Древесная растительность на втором высотном уровне, оцененная в 2002 году как редколесье, за 20-летний период трансформировалась в сомкнутое насаждение с достаточно высокой полнотой.

## 6. ДИНАМИКА ЗАПАСОВ ФИТОМАССЫ И ДЕПОНИРОВАННОГО УГЛЕРОДА

### 6.1. Взаимосвязи между весовыми и размерными показателями деревьев ели и березы

Экспериментальной основой в данных исследованиях послужили материалы таксации 88 модельных деревьев ели и 15 - березы. Выявлено, что в разновозрастных высокогорных древостоях, как и в одновозрастных, наблюдаются закономерные связи между фракциями надземной фитомассы деревьев ели и березы и их таксационным диаметром, которые корректно выражаются аллометрической функцией. Причем и у ели, и у березы наибольшей теснотой характеризуется связь массы стволов от диаметра деревьев ( $R^2=0,901$  и  $0,907$ ), а наименьшей – связь массы хвои/листвы от этого показателя ( $R^2=0,619$  и  $0,501$ ). Связь массы ветвей от диаметра деревьев по тесноте занимает промежуточное положение ( $R^2=0,758$  и  $0,897$ ).

Результаты исследований подтверждают известное в специальной литературе положение о преобладании в надземной фитомассе деревьев массы органов, длительно накапливающих органическое вещество – стволов и ветвей. Причем и у ели, и у березы с увеличением диаметра деревьев удельный вес стволовой массы возрастает, а хвои (листвы) и ветвей, наоборот, уменьшается. Отмеченное изменение структуры надземной фитомассы по мере возрастания толщины стволов, отличается от данных, полученных в одновозрастных насаждениях, и объясняется высокой разновозрастностью модельных деревьев, использованных при разработке уравнений. С увеличением толщины деревьев закономерно уменьшается охвоенность крон ели (с 47,5 до 28,7%) и облиственность крон березы (с 32,4 до 23,6%).

Исследователями высокогорных экосистем доказано, что по мере продвижения вверх по склону у деревьев одинакового диаметра их высота закономерно снижается, (Бабенко и др., 2008; Бартыш, 2008; Григорьев и др., 2012; Вьюхин, 2025). Об этом свидетельствуют и наши фактические данные. Уменьшение высоты деревьев одинакового диаметра приводит к уменьшению их объема, а, следовательно, и массы ствола. Поэтому при оценке надземной фитомассы древостоев, произрастающих на разных высотных уровнях с использованием общих уравнений, более корректным и обоснованным является применение в них в качестве независимой переменной не диаметра на высоте груди ( $D_{1,3}$ ), а комбинации этого показателя с высотой ( $H$ ) в виде  $D_{1,3}^2 \cdot H$  (в  $m^3$ ). Это обеспечивает учет изменений соотношений между диаметрами и высотами деревьев с повышением или понижением высотного положения древостоев и более точно определить фитомассу.

Выявлено, что зависимости массы стволов, ветвей и хвои/листвы ( $P_i$ ) от показателя  $D_{1,3}^2 \cdot H$  прямолинейны и характеризуются высокой теснотой (табл. 5).

Анализируя данные табл. 5 можно сделать заключение, что зависимости массы структурных частей деревьев от показателя  $D_{1,3}^2 \cdot H$  по тесноте не уступают зависимостям их от диаметра деревьев, а в некоторых случаях и превосходят. Рассчитанные уравнения (6.1) – (6.6) вполне адекватны фактическим данным модельных деревьев и корректно описывают исследуемые связи.

### 6.2. Динамика запасов надземной фитомассы и депонированного углерода в исследуемых древостоях

С использованием уравнений (6.1) – (6.6) и материалов индивидуального учета деревьев ели и березы в 2002, 2012 и 2022 годах рассчитаны запасы фитомассы древостоев по фракциям в разрезе высотных уровней исследуемого профиля. При этом в каждом конкретном случае для каждого дерева определялся его показатель  $D_{1,3}^2 \cdot H$ . Результаты расчетов представлены в табл. 6.

Таблица 5 – Статистические параметры уравнений зависимости фракций фитомассы деревьев ели и березы от их показателя  $D_{1,3}^{2*H}$  вида:  $P_i = a + b * D_{1,3}^{2*H}$

Фракции фитомассы	Символика	Значения коэффициентов		R <sup>2</sup>	№ уравнения
		a	b		
Ель					
Ствол	P <sub>с</sub>	4,6211	130,6600	0,972	(6.1)
Ветви	P <sub>в</sub>	3,0747	48,5630	0,775	(6.2)
Хвоя	P <sub>х</sub>	2,7132	18,0010	0,612	(6.3)
Береза					
Ствол	P <sub>с</sub>	3,1252	129,0800	0,952	(6.4)
Ветви	P <sub>в</sub>	2,0757	54,1390	0,841	(6.5)
Листва	P <sub>л</sub>	0,8671	21,0360	0,482	(6.6)

Таблица 6 – Запасы фракций надземной фитомассы древостоев ели и березы на исследуемом профиле

Древесная порода	Высотные уровни	Наземная фитомасса, кг/га,				общая
		стволов	крон		итого	
			ветвей	хвои		
1	2	3	4	5	6	7
2002 год						
Ель	1	495	280	215	495	990
	2	3507	1745	1158	2903	6410
	5	46728	18955	8867	27822	74550
Берёза	1	82	50	21	71	153
	2	373	214	88	302	675
	5	1872	828	325	1153	3025
2012 год						
Ель	1	939	462	302	764	1703
	2	7392	3686	2455	6141	13533
	5	58605	23085	10068	33153	91758
Берёза	1	223	188	78	266	489
	2	1405	762	310	1072	2477
	5	2502	1097	430	1527	4029
2022 год						
Ель	1	1399	701	469	1170	2569
	2	11085	5195	3171	8366	19451
	5	65657	25394	10561	35955	101612
Берёза	1	429	240	98	338	767
	2	2990	1496	600	2096	5086
	5	3363	1445	564	2009	5372

Данные табл. 6 показывают, что надземная фитомасса древостоев на всех высотных уровнях исследуемого профиля в основном формируется за счет деревьев ели. Доля деревьев этой породы в общей надземной фитомассе варьирует от 77 до 96%. Древостои, произрастающие на разных высотных уровнях, существенно различаются как по абсолютным значениям запасов надземной фитомассы, так и по соотношениям ее различных фракций. С продвижением в гору запас фитомассы закономерно уменьшается. Так, по материалам таксации 2022 года общая надземная фитомасса деревьев ели и березы составляет: на первом уровне 3336 кг/га, на втором – 24537 кг/га (в 7,4 раза боль-

ше, чем на первом), на пятом – 106984 кг/га (в 4,4 раза больше, чем вторым и в 32,1 раза – чем на первом). Выявляется, что на исследуемом профиле на каждые 10 м высоты над уровнем моря общая надземная фитомасса древостоев уменьшается в среднем на 10,36 т/га.

С повышением высоты над уровнем моря закономерно увеличивается доля кроновой массы в общей надземной фитомассе древостоев, а также процент хвои/листвы в общем запасе фитомассы крон. Данное положение объясняется ухудшением условий местопроизрастания и уменьшением возраста древостоев с повышением их высотной позиции.

Общая надземная фитомасса деревьев ели и березы за период с 2002 по 2022 годы повысилась: на первом высотном уровне с 1143 до 3336 кг/га (в 2,9 раза), на втором – 7085 до 24537 кг/га (в 3,5 раза) и на пятом – с 77575 до 106984 кг/га (в 1,4 раза). Таким образом, за 20-летний период наиболее заметные изменения надземной фитомассы произошли на втором уровне (в бывшем редколесье). Здесь показатели фитомассы в относительном выражении повысились на большую величину, чем на первом и пятом уровнях. Это объясняется тем, что древостои на втором уровне находятся в более лучших экологических условиях, чем на первом и имеют заметно меньший возраст, чем на пятом.

В табл. 7 в разрезе высотных уровней представлены данные о среднем изменении запасов общей надземной фитомассы древостоев ели и березы по двум периодам (2002-2012 годы и 2012-2022 годы). Из ее данных видно, что интенсивность изменения (увеличения) запаса надземной фитомассы ели выше в первой половине исследуемого периода, а у березы – во второй половине. Из этой закономерности несколько выпадают древостои на первом уровне. Указанные особенности изменения запасов за исследуемый период объясняются отмеченными выше особенностями формирования и роста деревьев ели и березы на профиле. В частности, существенное уменьшение (в 1,6 раза) во второй половине исследуемого периода интенсивности накопления надземной фитомассы древостоями пятого уровня можно объяснить увеличением их среднего возраста. Как было показано выше, за исследуемый период средний возраст древостоев заметно увеличился только на пятом уровне.

Таблица 7 – Запасы общей надземной фитомассы древостоев ели и березы и их среднее изменение по высотным уровням

Высотные уровни	Запас фитомассы по годам учета, кг/га			Среднее годовое изменение запаса, кг/га	
	2002 г.	2012 г.	2022 г.	с 2002 по 2012 г.г.	с 2012 по 2022 г.г.
Ель					
1	990	1703	2569	71	87
2	6410	13533	19451	712	592
5	74550	91758	101612	1721	985
Береза					
1	153	489	767	34	28
2	675	2477	5086	180	261
5	3025	4029	5372	100	134
Ель+береза					
1	1143	2192	3336	105	114
2	7085	16010	24537	893	853
5	77575	95787	106984	1821	1120

Представленные выше материалы позволяют оценить углерод депонирующую способность исследуемых древостоев. При оценке запасов углерода в фитомассе стволовой древесины и ветвей нами использовался коэффициент 0,5, а в фитомассе хвои (листвы) – 0,45. Результаты соответствующих расчетов приведены в табл. 8. Их анализ свидетельствуют, что темпы депонирования углерода в фитомассе древостоев во второй половине исследуемого периода по сравнению с первой на первом высотном уровне выше (0,057 т/га против 0,049 т/га), а на пятом, наоборот, заметно ниже (0,556 т/га против 0,904 т/га).

Таблица 8 – Запасы депонированного углерода в исследуемых древостоях и их изменения по высотным уровням и периодам исследования

Высотные уровни	Запас углерода в древостоях, т/га			Среднее изменение запаса углерода, т/га	
	2002 г.	2012 г.	2022 г.	с 2002 по 2012 г.г.	с 2012 по 2022 г.г.
1	0,558	1,076	1,642	0,049	0,057
2	3,478	7,867	12,085	0,439	0,422
5	38,335	47,375	52,934	0,904	0,556

В целом можно констатировать, что на протяжении исследуемого периода (с 2002 по 2022 годы) интенсивность депонирования углерода в надземной фитомассе древостоев на первом уровне закономерно возрастает, на втором находится примерно на одном уровне, а на пятом заметно снижается. Такое положение объясняется постоянным пополнением древостоев первого и второго уровней молодыми поколениями деревьев и увеличением их полноты.

Приведенные в табл. 8 абсолютные величины годовичного депонирования углерода заметно ниже данных, имеющих в специальной литературе для естественных ельников (Усольцев, 2018). Это объясняется низкой производительностью исследуемых древостоев, а на первом и втором уровнях – еще и низкой их полнотой.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В районе исследований в связи с современными изменениями климата наблюдается экспансия древесной растительности в горные тундры и повышение верхней границы леса. Об этом свидетельствует смещение на более поздние периоды начала появления ныне растущих деревьев на профиле, а также уменьшение возраста и полноты древостоев с повышением высоты над уровнем моря.

Лесовозобновительный процесс в высокогорьях существенно растянут во времени (на 80-120 лет). Растянутость во времени и пульсирующий характер лесовозобновления, обусловленные экстремальными экологическими и лесорастительными условиями, приводят к формированию циклично- и ступенчато-разновозрастных насаждений, сложенных из нескольких морфологически невыраженных поколений леса.

Редины и редколесья по сравнению с ниже расположенными сомкнутыми насаждениями, характеризуются повышением интенсивности лесовозобновления в последние десятилетия, естественным расширением диапазона изменения возраста деревьев и усложнением возрастной структуры древостоев. Ряды распределения возраста деревьев в них характеризуются резко выраженной положительной асимметрией и положительным эксцессом.

Ход роста исследуемых древостоев по высоте и диаметру корректно описываются функциями Мичерлиха и Корсуна. Возрастная динамика высоты и диаметра специфична для каждой породы. У древостоев одной и той же породы она существенно отличается по высотным уровням профиля. С повышением высоты над уровнем моря и у

ели, и у березы средняя высота при одинаковом возрасте закономерно понижается. По среднему диаметру такая закономерность не наблюдается. Наибольшими средними диаметрами ельники до 70-летнего возраста и березняки до 80-летнего характеризуются на втором высотном уровне. Отставание древостоев пятого уровня от древостоев второго и даже первого уровней по диаметру объясняется сдерживающим влиянием густоты сомкнутого насаждения на рост деревьев по диаметру: ухудшение лесорастительных условий на выше расположенных уровнях в значительной мере компенсируется снижением густоты произрастающих там древостоев.

С повышением высоты над уровнем моря закономерно снижаются средняя высота, абсолютная и относительная полнота и запас древесного яруса. Древостои на первом и втором уровнях характеризуются практически одинаковым составом. На пятом уровне доля участия березы в составе заметно ниже, чем на вышележащих уровнях. Это объясняется очень малым количеством деревьев этой породы на пятом уровне. Появление новых деревьев березы здесь закончилось еще в середине прошлого столетия и связано это с неблагоприятными условиями для возобновления светолюбивой березы под пологом сомкнутого древостоя.

За период с 2002 по 2022 годы наиболее заметные изменения в таксационной характеристике древостоев произошли на втором уровне (в бывшем редколесье). Здесь основные таксационные показатели древостоев повысились в относительном выражении на большую величину, чем на первом и пятом уровнях. По сравнению со вторым уровнем низкие темпы прироста показателей древостоев на первом уровне в основном обусловлены более жесткими экологическими условиями, а на пятом – высоким средним возрастом древостоев. Редколесье на втором высотном уровне за 20-летний период трансформировалась в сомкнутое насаждение с достаточно высокой полнотой.

Древостои, произрастающие на разных высотных уровнях, существенно различаются как по абсолютным значениям запасов надземной фитомассы, так и по соотношениям ее различных фракций. По материалам таксации 2022 года общая надземная фитомасса деревьев ели и березы на каждые 10 м высоты над уровнем моря уменьшается в среднем на 10,36 т/га. С повышением высотной позиции в фитомассе древостоев закономерно увеличивается доля кроновой массы, а также процент хвои/листвы в общем запасе крон. Это связано с ухудшением условий местопрорастания и уменьшением возраста древостоев по мере продвижения в горы.

За исследуемый период общая надземная фитомасса деревьев ели и березы повысилась: на первом высотном уровне в 2,9 раза, на втором – в 3,5 раза и на пятом – в 1,4 раза. Наиболее существенное повышение фитомассы произошло на втором уровне, на котором древостои находятся в более лучших экологических условиях, чем на первом и имеют заметно меньший возраст, чем на пятом.

Запас депонированного в фитомассе древостоев углерода за 20-летний период составил: на первом высотном уровне 1,084 т/га, на втором – 8,607 т/га, на пятом – 14,599 т/га. Причем на протяжении этого периода интенсивность депонирования углерода на первом уровне закономерно возрастает, на втором находится примерно на одном уровне, а на пятом заметно снижается. Такое положение объясняется особенностями формирования и роста древостоев на высотных уровнях.

В целом, особенности роста и формирования надземной фитомассы исследуемых абсолютно разновозрастных древостоев характеризуются принципиальным сходством с известными в специальной литературе положениями при вполне логичном количественном расхождении абсолютных и относительных показателей. Результаты исследований свидетельствуют о наблюдающейся в настоящее время пространственно-

временной трансформации лесной растительности в горах Южного Урала, инициированной современными изменениями климата.

Для использования в практической и научно-исследовательской деятельности оформлены и рекомендуются следующие результаты работы:

- уравнения и таблицы возрастной динамики высот и диаметров деревьев ели и березы;
- уравнения зависимости видовой высоты от высоты древостоев ели и березы;
- таблицы таксационной характеристики древостоев;
- уравнения и таблицы для оценки фракций надземной фитомассы деревьев;
- таблицы запасов фракций надземной фитомассы древостоев ели и березы;
- таблицы запасов депонированного углерода в фитомассе древостоев.

В целом, полученные материалы могут применяться при проведении лесоучетных и научно-исследовательских работ, оценке пространственно-временной динамики древесной растительности и определении бюджета углерода в лесах региона.

### СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

*Публикации в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ и входящих в международные реферативные базы данных и системы цитирования*

1. Grigoriev, A.A. Upward treeline shifts in two regions of Subarctic Russia are governed by summer thermal and winter snow conditions / A.A. Grigoriev, Y.V. Shalaumova, S.O. Vyukhin, **D.S. Balakin**, V.V. Kukarskikh, A.A. Vyukhina, J.J. Camarero, P.A. Moiseev // *Forests*. – 2022. – Vol. 13. – 174.

2. Moiseev, P.A. Stand Biomass at Treeline Ecotone in Russian Subarctic Mountains Is Primarily Related to Species Composition but Its Dynamics Driven by Improvement of Climatic Conditions / P.A. Moiseev, F. Hagedorn, **D.S. Balakin**, M.O. Bubnov, N.M. Devi, V.V. Kukarskikh, V.S. Mazepa, S.O. Viyukin, A.A. Viyukhina, A.A. Grigoriev // *Forests*. – 2022. – Vol. 13. – 254.

3. Григорьев, А.А. Пространственно-временная динамика продвижения древесной и кустарниковой растительности в горную тундру Дальнего Таганая (Южный Урал) / А.А. Григорьев, Р.С. Клям, С.О. Вьюхин, А.М. Громов, **Д.С. Балакин**, И.Б. Воробьев, Ю.В. Шалаумова // *Леса России и хозяйство в них*. – 2023. – № 3 (86). – С. 28-38.

4. Вьюхин, С.О. Структура и динамика ценопопуляций ольховника кустарникового в экотоне лес-горная тундра западной части плато Путорана / С.О. Вьюхин, А.А. Григорьев, **Д.С. Балакин**, А.С. Тимофеев, П.А. Моисеев // *Сибирский лесной журнал*. – 2024. – № 4. – С. 38-47.

5. Moiseev, P.A. Leading directions and effective distance of larch offspring dispersal at the upper treeline in the Northern and Polar Urals, Russia / P.A. Moiseev, V.L. Semerikov, T.V. Semerikova, **D.S. Balakin**, I.B. Vorobiev, S.O. Viuykhin // *Forest Ecosystems*. – 2024. – Vol. 11. – P. 100218.

6. Нагимов, З.Я. Запаса надземной фитомассы и депонирование углерода в древостоях ели в высокогорьях Южного Урала / З.Я. Нагимов, А.А. Григорьев, **Д.С. Балакин**, А.А. Бартыш, П.А. Моисеев, И.В. Шевелина // *Сибирский лесной журнал*. – 2025. – № 4. – С. 56-67.

7. Гайсин, И.К. Структура древостоев и особенности накопления ими фитомассы на остепенённых склонах массива гор Крака (Южный Урал) / И.К. Гайсин, П.А. Моисеев, **Д.С. Балакин**, З.Я. Нагимов // *Вестник Томского государственного университета. Биология*. – 2021. – № 56. – С. 125-151.

8. Moiseev, P.A. Structural Changes of Stands on Their Upper Limit at the Polar Urals over the Last 60 Years and Factors Effecting on Tree Establishment Rate / P.A. Moiseev, V.S. Mazepa, **D.S. Balakin**, Y.V. Shalaumova, S.O. Viyukhin, A.A. Grigoriev // Russian Journal of Ecology. – 2024. – Vol. 55, No. 6. – P. 415-427.

9. Григорьев, А.А. Комплексная оценка климатогенной трансформации высокогорных лесных экосистем Южного Урала (на примере массива Ирмель) / А.А. Григорьев, Ю.В. Шалаумова, Е.В. Болотник, **Д.С. Балакин**, П.А. Моисеев // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Биология. – 2022. – Т. 15, № 2. – С. 148-166.

10. Grigoriev, A.A. Alpine Shrubification: Juniper Encroachment into Tundra in the Ural Mountains / A.A. Grigoriev, Yu.V. Shalaumova, **D.S. Balakin**, O.V. Erokhina, S.Y. Abdulmanova, P.A. Moiseev, J.J. Camarero // Forests. – 2022. – Vol. 13, No. 12. – P. 2106

11. Григорьев, А.А. Продвижение древесно-кустарниковой растительности в горы и изменение состава тундровых сообществ (хр. Зигальга, Южный Урал) / А.А. Григорьев, О.В. Ерохина, С.Ю. Соковнина, Ю.В. Шалаумова, **Д.С. Балакин** // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Биология. – 2018. – Т. 11, № 3. – С. 218-236.

#### *Публикации в других изданиях*

12. Вьюхин, С.О. Современная экспансия древесно-кустарниковой растительности на малоснежных участках склонов г. Дальний Таганай (Южный Урал) / С.О. Вьюхин, А.А. Григорьев, П.А. Моисеев, **Д.С. Балакин**, Ю.В. Шалаумова // Научное творчество молодежи – лесному комплексу России: Материалы XVII Всеросс. науч.-техн. конф. – Екатеринбург: УГЛТУ, 2021. – С. 233-235.

13. Вьюхин, С.О. Структура и динамика древесной растительности в горах плато Путорана / С.О. Вьюхин, А.А. Григорьев, **Д.С. Балакин**, Ю.В. Шалаумова, А.С. Тимофеев, П.А. Моисеев // Биоразнообразие экосистем Крайнего Севера: инвентаризация, мониторинг, охрана: Материалы IV Всеросс. науч. конф. – Сыктывкар: ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, 2023. – С. 18-24.

14. **Балакин, Д.С.** Оценка погодичного изменения запаса фитомассы в возрастных группах лиственницы сибирской на Полярном Урале / Д.С. Балакин, С.О. Вьюхин, А.М. Громов, П.А. Моисеев, А.А. Григорьев // Горные экосистемы и их компоненты: Материалы IX Всеросс. конф. с междунар. участием, посвященной 300-летию Российской академии наук, 30-летию Института экологии горных территорий им. А.К. Темботова РАН. – Нальчик, 2024. – С. 65.

15. **Балакин, Д.С.** Особенности формирования древостоев ели в высокогорьях Южного Урала / Д.С. Балакин, З.Я. Нагимов, П.А. Моисеев, А.А. Григорьев, С.О. Вьюхин // Лесные экосистемы в условиях меняющегося климата: проблемы и перспективы: Материалы междунар. науч.-практ. конф., посвященной 110-летию каф. лесоводства, лесной таксации и лесоустройства, к 95-летию ВГЛТУ. – Воронеж: ВГЛТУ, 2025. – С. 142-148.

Отзыв на автореферат просим направить по адресу: 620100 г. Екатеринбург, Сибирский тракт, 37, УГЛТУ, ученому секретарю диссертационного совета 24.2.424.02 Магасумовой А.Г. E-mail: dissovet.usfeu@mail.ru

Подписано в печать 27.03.2026. Объем 1.0 авт.л. Заказ № \_\_\_\_\_. Тираж 100.

620100, г. Екатеринбург, Сибирский тракт, 37.

ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет».

Сектор оперативной полиграфии РИО