

**Вьюхин Сергей Олегович**

**ФОРМИРОВАНИЕ И СОВРЕМЕННАЯ СТРУКТУРА ДРЕВОСТОЕВ  
ЛИСТВЕННИЦЫ ГМЕЛИНА (*LARIX GMELINII* (RUPR.) RUPR.)  
В ВЫСОКОГОРЬЯХ ПЛАТО ПУТОРАНА  
(НА ПРИМЕРЕ МАССИВА СУХИЕ ГОРЫ)**

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

Диссертация  
на соискание ученой степени  
кандидата сельскохозяйственных наук

Научный руководитель:  
доктор сельскохозяйственных наук  
Нагимов Зуфар Ягфарович

## Оглавление

|                                                                                                                   |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Введение.....                                                                                                     | 4  |
| Глава 1. Состояние вопроса.....                                                                                   | 9  |
| 1.1 Изменение климата и динамика верхней границы леса.....                                                        | 9  |
| 1.2 Исследования радиального роста деревьев в горных районах Субарктики.....                                      | 20 |
| 1.3 Исследования фитомассы деревьев и древостоев в горных условиях.....                                           | 24 |
| Глава 2. Природно-климатические и техногенные условия района исследования.....                                    | 28 |
| 2.1 Географическое положение района исследования.....                                                             | 28 |
| 2.2 Климат.....                                                                                                   | 29 |
| 2.3 Рельеф.....                                                                                                   | 30 |
| 2.4 Почвы.....                                                                                                    | 31 |
| 2.5 Гидрография.....                                                                                              | 32 |
| 2.6 Растительный покров.....                                                                                      | 33 |
| 2.7 Техногенные условия.....                                                                                      | 35 |
| Глава 3. Программа, объект, методика исследований и объем выполненных работ.....                                  | 38 |
| 3.1 Программа исследований.....                                                                                   | 38 |
| 3.2 Объект исследований.....                                                                                      | 39 |
| 3.3 Методика исследований.....                                                                                    | 39 |
| 3.4 Объем выполненных работ по теме диссертации .....                                                             | 51 |
| 3.5 Таксационная характеристика древостоев лиственницы .....                                                      | 52 |
| Глава 4. Оценка локальных условий местопроизрастания и радиального прироста лиственницы на высотных профилях..... | 56 |
| 4.1 Анализ изменений климата по данным метеостанций.....                                                          | 56 |
| 4.2 Оценка локальных условий местопроизрастания на заложенных высотных профилях.....                              | 62 |
| 4.3 Радиальный прирост лиственницы .....                                                                          | 67 |

|                                                                                                                    |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Глава 5. Особенности формирования и возрастная структура древостоев лиственницы в высокогорьях плато Путорана..... | 86  |
| 5.1 Особенности формирования лиственничников.....                                                                  | 86  |
| 5.2 Возрастная структура древостоев лиственницы.....                                                               | 94  |
| Глава 6. Современное строение древостоев лиственницы по основным таксационным показателям.....                     | 109 |
| 6.1. Распределение деревьев лиственницы по таксационным показателям....                                            | 109 |
| 6.1.1 Распределение деревьев лиственницы по диаметру.....                                                          | 109 |
| 6.1.2 Распределение деревьев лиственницы по высоте.....                                                            | 115 |
| 6.2 Взаимосвязи таксационных показателей деревьев.....                                                             | 120 |
| 6.2.1 Взаимосвязь диаметра и высоты деревьев.....                                                                  | 121 |
| 6.2.2 Взаимосвязь диаметра крон с диаметром стволов.....                                                           | 127 |
| 6.2.3 Зависимость диаметра стволов от их высоты и диаметра крон.....                                               | 134 |
| Глава 7. Запасы надземной фитомассы и депонированного углерода в древостоях лиственницы .....                      | 145 |
| 7.1 Взаимосвязи между весовыми и размерными показателями деревьев лиственницы.....                                 | 146 |
| 7.2 Запасы надземной фитомассы и депонированного углерода в исследуемых лиственничниках.....                       | 160 |
| Заключение.....                                                                                                    | 170 |
| Список литературы.....                                                                                             | 179 |

## Введение

**Актуальность темы.** На современном этапе одной из важнейших научных проблем признается количественная оценка реакции лесных экосистем на наблюдающиеся изменения климата (Будыко, 1989; Шиятов, 2009; Моисеев, 2011). В этом плане большое количество исследований проводится в высокоширотных и высокогорных районах, в которых климатически обусловленные изменения древесно-кустарниковой растительности проявляется наиболее рельефно (Шиятов, Мазепа, 2007; Hagedorn et al., 2020). В разных регионах планеты получены сведения, свидетельствующие об экспансии древесной растительности в горную тундру, обусловленной улучшением климатической обстановки. Повышение верхней границы леса, связанное с этим процессом, указывает на расширение в горных районах площадей, занятых лесными насаждениями. Эти насаждения в лесоводственно-таксационном отношении до сих пор остаются слабо изученными. В тоже время исследования их формирования, структуры, роста и продуктивности в современных условиях приобретают чрезвычайную актуальность. Результаты их важны как для индексации изменений условий среды, так и оценки масштабов зарастания лесной растительностью ранее безлесных территорий горной тундры, экологической и биосферной роли сформировавшихся насаждений, а также обоснования методических решений по их таксации.

Работа выполнена при поддержке грантов РНФ № 17-14-01112, № 21-14-00137 и № 24-14-00206.

**Степень разработанности темы исследований.** К настоящему времени исследователями высокогорных экосистем в различных регионах планеты в русле нашей работы получены разносторонние данные о лесовозобновлении на горных массивах (Горяева, 2008), расселении древесно-кустарниковой растительности в горные тундры и поднятии верхней границы леса (Шиятов, 2009), роли различных факторов, препятствующих и способствующих этому процессу (Моисеев, 2011), климатогенном формообразовании растений (Мазепа, 1999; Дэви, 2008), особенностях формирования и структуре древостоев в условиях

высокогорий (Бабенко, 2006; Бартыш, 2008; Григорьев, 2011). Несмотря на обширный объем информации, особенности формирования древостоев в экотоне верхней границы древесной растительности (ЭВГДР), их строение, рост и углерод депонирующая способность остаются слабо изученными.

**Цель исследования** – выявление особенностей формирования древостоев лиственницы в высокогорьях плато Путорана в меняющихся климатических условиях, оценка их современного строения и надземной фитомассы.

**Задачи исследований.** Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Изучение лесорастительных условий на различных склонах и высотах над уровнем моря в ЭВГДР и их влияния на динамику морфологических показателей и радиального прироста деревьев.

2. Анализ особенностей формирования древостоев лиственницы на склонах различной экспозиции в ЭВГДР и их возрастной структуры.

3. Исследование строения древостоев, сформировавшихся в пределах ЭВГДР на различных склонах и высотных уровнях.

4. Оценка запасов надземной фитомассы и депонированного углерода в древостоях лиственницы в условиях ЭВГДР.

**Научная новизна.** Впервые в условиях плато Путорана исследована динамика верхней границы леса на основе анализа возрастной структуры древостоев лиственницы, сформировавшихся на склонах разной экспозиции. На основе построения древесно-кольцевых хронологий выявлено влияние на радиальной прирост деревьев экспозиции склона, высоты над уровнем моря и температуры воздуха отдельных месяцев. Выявлены особенности дифференциации деревьев и закономерности их распределения по возрасту, диаметру и высоте, а также взаимосвязи между таксационными показателями стволов и крон на разных склонах и высотных уровнях. Оценены запасы и структура надземной фитомассы и объемы депонированного в ней углерода в исследуемых лиственничниках.

**Теоретическая и практическая значимость работы.** Результаты исследований расширяют современные представления и знания об особенностях формирования лесных насаждений в ЭВГДР в условиях современного изменения климата, о структуре и показателях роста, сформировавшихся на различных склонах и высотных уровнях древостоев. Они могут служить теоретической, методической и экспериментальной базой при проведении научных и лесоучетных работ, индексации климатических изменений, построении моделей пространственно-временной динамики растительности в высокогорьях, оценке углерод депонирующей способности высокогорных лиственничников.

**Методология и методы исследования.** Методологической основой работы послужили экспериментальные разработки и теоретические обобщения ученых-исследователей высокогорных экосистем. При решении поставленных задач применялась комплексная оценка древостоев на заложенных высотных профилях и пробных площадях.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. В связи с потеплением климата в высокогорьях плато Путорана произошло поднятие верхней границы леса - на ранее безлесных территориях сформировались разновозрастные древостои разных типов возрастной структуры, состоящие из нескольких морфологически невыраженных поколений леса.
2. Изменения древесно-кольцевых хронологий радиальных приростов на склонах разной экспозиции имеют общие закономерности; на величину радиального прироста деревьев существенное влияние оказывают экспозиция склонов и высотная позиция древостоев.
3. Строение, морфологические параметры и надземная фитомасса древостоев в ЭВГДР обусловлены экспозицией склонов, а в пределах их – высотой над уровнем моря.
4. В сформировавшихся в ЭВГДР древостоях, несмотря на их высокую гетерогенность по возрасту и размерам деревьев, сохраняются закономерности строения, присущие элементам (поколениям) леса, поэтому при их производ-

ственной таксации возможна синтетическая (общая) оценка таксационных показателей.

**Достоверность и обоснованность результатов исследования** обеспечивается комплексным подходом к изучению древостоев в ЭВГДР, анализом значительного по объему экспериментального материала, собранного и обработанного с использованием современных методик и приемов, качественным совпадением результатов с данными аналогичных исследований на других объектах.

**Апробация результатов работы.** Основные результаты исследований докладывались на Всероссийской (национальной) научно-технической конференции студентов и аспирантов «Научное творчество молодежи – лесному комплексу России» (Екатеринбург, 2018, 2021, 2022, 2024), Всероссийской конференции молодых ученых «Экология, гипотезы, факты, модели» (Екатеринбург, 2021, 2022), 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).

**Личный вклад автора.** Соискателем проведен сбор и обработка значительной части экспериментального материала в полевых условиях, а также анализ и интерпретация полученных результатов. Сформулированы результаты и выводы.

**Публикации.** Основные материалы по теме научного исследования опубликованы в 16 научных работах, в том числе 2 работы в журналах, рекомендуемых ВАК РФ по научной специальности 4.1.6; 4 – в изданиях, индексируемых в международных базах научного цитирования Web of Science и Scopus.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация изложена на 200 страницах и включает в себя введение, семь глав и заключение. Библиографическое

описание включает в себя 215 источников, в том числе 65 на иностранных языках. Текст диссертации проиллюстрирован 39 рисунками и 23 таблицами.

**Благодарности.** Автор выражает искреннюю признательность научному руководителю, доктору сельскохозяйственных наук, профессору Нагимову Зуфару Ягфаровичу за помощь в подготовке и написании диссертации. Особую благодарность выражаю за бесценные консультации, помощь в подборе методических подходов и методов исследований доктору биологических наук Моисееву П.А. и кандидату сельскохозяйственных наук Григорьеву А.А. Также автор глубоко признателен коллегам, принимавшим участие в первичной обработке материала – кандидатам биологических наук Н.М. Дэви и В.В. Кукарских (ИЭРиЖ УрО РАН).

## Глава 1. Состояние вопроса

### 1.1. Изменение климата и динамика верхней границы леса

Глобальное изменение климата стало предметом обсуждения ещё в XIX веке, когда был обнаружен парниковый эффект физиком Жозефом Фурье (Fourier, 1824). В 1861 году ирландский физик Джон Тиндалл идентифицировал газы и предположил, что они, включая углекислый газ, могли вызвать такой эффект (Tyndall, 1861). На государственном уровне данной проблемой заинтересовались только к середине XX века. Так, первые две всемирные конференции по климату прошли в Женеве при поддержке всемирной метеорологической организации в 1979 и 1990 гг. В 1980-х гг. организован ряд международных научных семинаров окружающей среде (ЮНЕП) ООН и Всемирной метеорологической организацией. В 1992 г. в Рио-де-Жанейро была принята Рамочная Конвенция ООН об изменении климата. В 1997 г. представителями 84-х стран мира подписан Киотский протокол, направленный на сокращение выбросов парниковых выбросов в атмосферу (Изменение климата..., 2001). На данный момент количество участников протокола составляет 192. С 1988 г. началась деятельность Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК). МГЭИК не проводит собственных исследований. МГЭИК было поручено провести обзор рецензируемой научной литературы и других соответствующих публикаций для предоставления информации о состоянии знаний об изменении климата. Ведущие специалисты оценивают информацию на основе опубликованных материалов. Начиная с 1996 года проходит ежегодная конференция ООН по вопросам изменения климата. С середины 1990-х на ней также ведутся переговоры в рамках Киотского протокола (МГЭИК, 2014).

В последние десятилетия процесс изменения климата значительно ускорился. Эксперименты с климатическими моделями показывают, что увеличение температуры из-за глобального потепления особенно выражено в северных высоких широтах, таких как Евразийская лесная зона (Изменение климата...,

2013). В свою очередь, повышение температуры может привести к расширению бореальных лесов на север до территории, ныне занятые тундрой.

В последние десятилетия различные учёные со всего мира прогнозируют глобальное потепление (IPCC, 2021). Каждое из последних четырех десятилетий было существенно теплее, чем любое предшествовавшее десятилетие с 1850 года. Глобальная температура поверхности в первые два десятилетия XXI века (2001–2020 гг.) была на 0,99°C выше, чем в 1850–1900 гг. Она росла быстрее с 1970 года, чем в любой другой 50-летний период по крайней мере за последние 2000 лет. Температуры в течение последнего десятилетия (2011–2020) превышают температуры самого последнего многовекового теплого периода (около 6500 лет назад).

На фоне общих изменений климатических условий (увеличения среднегодовой температуры и перераспределения осадков) трансформируются и лесные экосистемы. Поэтому лесные экосистемы могут иметь индикаторное значение при мониторинге изменения климата. Изучением реакции лесных экосистем на изменение климата занимаются множество учёных по всему миру (Шиятов, Мазепа, 2007; Капралов и др., 2007; Анисимов и др., 2011; Замолотчиков, 2015; Kullman, Engelmark, 1997; Kaplan et al., 2012).

Одним из индикаторов изменения условий местопроизрастания служат годовые кольца древесной растительности. На ширину годовых колец влияют такие микроклиматические факторы как температура воздуха и осадки (Ваганов, Шиятов, 1998). В настоящее время опубликовано множество работ с результатами изучения влияния данных факторов на ширину годовых колец (Шиятов, 1986; Комин, 2003; Харук и др., 2005; Fritts, 1976; Schweingruber, 1996).

Наиболее остро на изменение климата реагируют лесные экосистемы, расположенные в экстремальных условиях, для которых даже незначительные изменения могут влиять как положительно, так и отрицательно. Основным ли-

митирующим фактором в высокогорных районах крайнего севера является летняя температура воздуха (Ваганов и др., 1996; Harsch et al., 2009).

Однако для определения влияния климата на горную растительность нужно чётко понимать, что подразумевается под верхней границей леса. В своей работе С. Кёрнер и Г. Хоч (Körner, Hoch, 2023) дают чёткие определения, что можно считать климатической границей леса. Они разделяют климатическую границу деревьев и границу деревьев, ограниченную пожаром, антропогенными факторами или иными другими. Авторами было предложено понятие дерева на верхней границе леса. По их мнению, минимальная высота, на которой на дерево воздействуют атмосферные условия, составляет 2 метра. Граница древесной растительности представляет собой постепенный переход от деревьев к карликовым кустарникам, круммгольцам и подросту. Поэтому не каждая лесная опушка представляет собой границу леса.

Значительный вклад в изучение верхних и полярных пределов распространения древесной растительности в России и в том числе на Урале внёс П.Л. Горчаковский (1975, 1985) и С.Г. Шиятов (1981, 1986).

Высотное расположение границы леса в значительной степени контролируется летними температурами и продолжительностью вегетационного периода (Körner, 2012).

Дендроэкологические исследования показывают увеличение в высокогорьях популяции хвойных пород в двадцатом веке. Однако хвойные деревья еще не заселили многие территории, где деревья росли в средние века, в теплый период (около 800–1300 гг. н.э.) или в период голоценового термического максимума (около 10 000–3000 лет назад). Реконструкция распределения деревьев во время голоценового термического максимума предполагает, что будущее положение верхней границы деревьев из-за глобального потепления может приближаться к своему прежнему максимальному положению голоцена (MacDonald et al., 2007).

Анализ литературных источников показал неоднородность мнений исследователей о факторах, влияющих на динамику верхней границы леса. Некото-

рые исследователи (Kearney, 1982; Woodward et al., 1995) предполагают, что в первую очередь экспансия древесной растительности происходит благодаря изменению средних, минимальных температур, а также количества осадков в тёплое время года.

Другие же группы исследователей (Lavoie, Payette, 1992; Weisberg, Baker, 1995; Kullman, Engelmark, 1997) предполагают, что выживание древесных пород на пределе своего распространения зависит от факторов, влияющих в холодное время года (глубина снега, температура воздуха и скорость ветра). Данные факторы определяют термический режим почв и степень повреждения снежной абразией частей растений, которые находятся выше уровня снега.

Л. Куллман и Л. Оберг (Kullman, Öberg, 2009), повторно обследовав описанные в начале XX века древостой в высокогорьях Скандинавии, установили, что верхняя граница групп деревьев высотой более 2 м выходит на самые высокие позиции в более многоснежных районах. Причем с 1915 года продвижение наблюдалось в наибольшей степени на вогнутых и защищенных от ветров участках склонов.

Группа учёных (Harsch et al., 2009) провела анализ 166 публикаций, посвященных изучению динамических процессов на верхних пределах распространения древесных видов в различных высокогорных регионах мира. В большинстве проанализированных работ наиболее существенные изменения в продвижении растительности наблюдались в тех регионах, где в последнем столетии отмечалось более значительное увеличение температур холодного периода года.

С момента выхода этой обзорной статьи (Harsch et al., 2009) было опубликовано множество работ, посвящённых смещению верхней границы деревьев. В своей работе Аманда Ханссон с соавторами (Hannson et al., 2021) проанализировали 142 публикации, связанных с верхней границей леса, включающие в себя 477 мест проведения исследований. Обзор показал, что на 66% исследуемых участков верхней границы леса наблюдается увеличение лесного покрова в высотном или широтном масштабе. В зависимости от физической формы лес-

ных полос изменяется вероятность миграции деревьев, что может использоваться в качестве индикатора при прогнозировании смещения границы леса. Происходящие изменения могут существенно влиять на запасы углерода.

Результаты исследований лиственницы сибирской в высокогорьях Полярного Урала показали, что улучшение климатических условий приводит к массовому формированию деревьев с многоствольной жизненной формой путем формирования вертикальных стволиков у стланиковых жизненных форм. Причем разные жизненные формы характеризуются различными темпами линейного и радиального приростов (Мазепа, 1999; Дэви, 2008).

Экспозиции склона оказывает существенное влияние на рост деревьев вне зависимости от региона. Так, в тёплых и засушливых регионах наиболее благоприятными являются северные экспозиции, испытывающие меньшее влияние влагодефицита (Андреев и др., 2001; Матвеев, 2003; Кукарских, 2009; Гайсин, 2021; Schulman, 1956; Wang et al., 2005; Guarin, Taylor, 2005; Xu et al., 2017). Данные авторы считают, что определяющее значение на рост деревьев (в т.ч. на величину годичного прироста) оказывает влагообеспеченность, которая зависит от температуры воздуха, ветровой особенности, экспозиции склона, а также эдафических условий.

В северных регионах, которые отличаются суровым климатом и коротким летним периодом, более обогреваемая южная экспозиция является наиболее благоприятной для древесной растительности (Машуков и др., 2014).

В своей статье N.J. Kuyek (2019) приводит результаты исследования закономерностей изменения размеров крон деревьев хвойных насаждений на северо-западе Британской Колумбии. На юге средняя высота, диаметр и объём кроны были наибольшими, а на севере наименьшими. Авторы так же предполагают, что снижение уровня радиации в северных широтах и увеличение освещенности и тепла на более крутых южных склонах способствует росту. Более холодные, затененные, северные участки с повышенным снегонакоплением, задержкой таяния снега и снижением минерализации азота тормозят рост растений.

А.В. Бенькова с соавторами (Бенькова и др., 2015) выявили существенные различия в динамике радиального роста деревьев лиственницы Гмелина на склонах северной и южной экспозиции в лиственничных и лиственнично-темнохвойных северотаежных лесах в центральной части плато Сыверма. Их расчёты показали, что поступающая солнечная радиация на северном склоне на 20% ниже, чем на южном. Так же были обнаружены более худшие биометрические характеристики и более низкий радиальный прирост у деревьев на склоне северной экспозиции.

Схожие процессы наблюдаются и в лесах юго-запада Юкона в Канаде. R. Danby и D.S. Hik (Danby, Hik, 2007) изучили динамику верхней границы леса на 6 топографически различных, но схожих по климату участках. В результате проведённых исследований были выявлены значительные различия в зависимости от экспозиции. На южных склонах граница леса поднялась на 65-85 м над уровнем моря. На склонах северной экспозиции граница не сдвинулась, однако густота насаждений увеличилась на 40-65%.

K.D. Dearborn в своей работе в горах Канады (Dearborn, 2017) доказал что экспозиция и уклон имеют большее влияние на состав растительного сообщества, чем высота над уровнем моря в лесотундре. Автор предполагает, что различия, связанные с экспозицией, были обусловлены более высокой температурой почвы и более глубокими активными слоями на южном склоне по сравнению со склонами северной экспозиции, в тоже время как различия, связанные с углом наклона, имели место только на склонах, обращенных на север, и были вызваны влагой почвы.

Известно, что экспозиция склона может оказывать влияние на ветровой режим (Holtmeier, Broll, 2010). Ветер оказывает как механическое, так и физиологическое воздействие на деревья. Сильные ветра ограничивают высоту деревьев и вызывают подавленные формы роста. Помимо этого, ветер рассеивает семена, перемещает снежные массы и локально может размывать почвы в экотоне верхней границы леса. Поэтому авторы предполагают, что воздействие

ветра следует считать важным фактором, который может задержать или даже исключить укоренение саженцев деревьев на продуваемой ветром местности.

Начало вегетационного периода происходит при достижении определённых пороговых температур. Авторы (Rossi et al., 2007), используя разные породы выявили пороговые значения температуры воздуха и ствола в пределах от 5,6 до 8,5°C и от 7,2 до 9°C, соответственно. Данные результаты дают веские доказательства того, что температура является критическим фактором, контролирующим производство и дифференциацию клеток ксилемы на больших высотах. В зависимости от экспозиции начало вегетации может существенно различаться.

С. Кёрнер (Körner, 2012) выявил связь между количеством солнечной радиации и приживаемостью саженцев. В условиях северных горных территорий большее количество солнечной радиации и более теплые условия могут повысить приживаемость саженцев деревьев и молодняков и развитие деревьев в целом.

В настоящее время исследований, направленных на выявление и оценку сдвигов верхних границ распространения древесной и кустарниковой растительности на плато Путорана проведено ограниченное количество. Данное обстоятельство обусловлено тем, что район исследования является одним из труднодоступных субарктических районов России.

В начале второй половины XX-го века Г.И. Галазий были построены древесно-кольцевые хронологии для лиственницы Гмелина, произрастающей на плато Путорана. Период хронологий составил с 1700 по 1959 и с 1866 по 1969 гг. (Галазий, 1981).

Реконструкцией климата на востоке Таймыра с использованием сверхдлительных хронологий занимались Е.А. Ваганов и М.М. Наурзбаев. Они реконструировали для восточного Таймыра и Путорана древесно-кольцевую хронологию величиной 2209 лет (с 212 г. до н.э. по 1996 г. н.э.) при помощи живых деревьев и хорошо сохранившихся остатков сухостойных деревьев (Naurzbaev and Vaganov, 2000). Высокие значения синхронности отдельных рядов

годовых колец показали преобладающее влияние одного внешнего фактора на изменение радиального роста деревьев. Основными факторами изменчивости роста являются раннелетние и годовые температуры, которые объясняют до 70% изменчивости скорости роста деревьев. Надземная фитомасса так же существенно отличается в разных частях экотона. Всего надземная биомасса уменьшается примерно с 40 т./га в сомкнутом лиственничном лесу до 5 т./га на границе леса.

Также М.М Наурзбаев с коллегами (Наурзбаев и др., 2001) с использованием древесно-кольцевой хронологии длительностью 2428 лет выявили устойчивое влияние на изменчивость роста одного лимитирующего фактора - температуры. На основе полученной хронологии были проанализированы экстремумы погодичной и вековой изменчивости в динамике раннелетних температур воздуха за последние 2,5 тыс. лет. Авторы выявили, что современное потепление по амплитуде не достигает пределов прошлых изменений температуры, а по сравнению с климатическим оптимумом голоцена является незначительным.

Значительный вклад в изучение данного вопроса внесли и другие исследователи (Им, Харук, 2013; Kirilyanov et al., 2012; и др.). С.Т. Им и В.И. Харук (2013) на основе космических съёмок Landsat исследовали пространственно-временную динамику экотона горной лесотундры плато Путорана за последние 36 лет. Авторами было выявлено увеличение редколесий на 60%. Рост среднегодовой температуры так же способствовал продвижению древесной растительности по высоте. С увеличением высоты над уровнем моря деревья отдают предпочтение локальным депрессиям на более прогреваемым юго-западным склонах с крутизной до 30°.

В своей работе А.В. Кирдянов с коллегами (Kirilyanov et al., 2012) оценили динамику древесной растительности и биомассы в экотоне лесотундры за последнее столетие. Авторы выявили значительное снижение среднего возраста лиственницы Гмелина по мере продвижения в гору. Также в экотоне наблюдается значительная всхожесть семян (1500 шт./га), что свидетельствует об увеличении густоты редколесий, а также смещению границы древесной раститель-

ности вверх по склону (примерно на 30-50 м по высоте в течении прошлого века). Авторы связывают расширение площади лесов с большим увеличением зимних осадков в 20 веке. А темпы роста деревьев положительно связаны с летними температурами.

Е.Ю. Новенко с коллегами (Новенко и др., 2022) представили реконструкцию естественной динамики окружающей среды, лесных пожаров и изменения растительности при помощи радиоуглеродного датирования на северо-западе плато Путорана в течение последнего десятилетия. Результаты исследования на болоте Герви показали, что средневековое потепление привело к облесению территории исследования, а также её расширению до 70 км к северо-востоку от нынешнего географического диапазона. Относительно сухой климат, по крайней мере, в части объекта исследования, вызвал частые лесные пожары. Однако влияние малого ледникового периода привело к увеличению доли тундровых сообществ и снижению пожарной активности.

С 1990 г. макроскопическая скорость накопления древесного угля на торфянике Герви резко возросла, что позволяет предположить недавнее увеличение частоты и площади лесных пожаров. Современное изменение климата в арктических регионах однозначно способствовало повышению пожарной активности. Данная тенденция может усилиться в будущем.

В работе С.М. Матвеева и Д.И. Гупалова (2015) представлены результаты лесоводственного анализа таксационных характеристик древостоев лиственницы Гмелина в различных лесорастительных условиях плато Путорана. Анализ показал, что из трёх различных лесорастительных условий наиболее благоприятными являются межгорные распадки (листвяг ольховый), а наиболее худшие условия наблюдаются на склонах южной экспозиции (листвяг багульниково-сфагновый).

Для западной части плато Путорана Е.Ю. Новенко с соавторами (Новенко и др., 2022) провели реконструкцию растительности и условий окружающей среды за последние 4000 лет. Результаты исследования показали схожесть при-

родных условий к современным на протяжении 4000 лет. Однако было установлено, что в период между 3,1 и 2,5 тыс. лет назад произошло увеличение в нижних поясах плато пространств, занятых лесами и редколесьями, состоявшими из лиственницы, ели и берёзы. Это наиболее вероятно связано с потеплением климата. Однако наступившее затем похолодание привело к деградации лесной растительности, а также почти полному исчезновению лесных сообществ ели.

Кустарниковая растительность играет важную фитоценотическую роль в сложении высокогорных растительных сообществ и так же активно распространяется выше в гору на верхних пределах распространения древесной растительности (Boulanger-Lapointe et al., 2016). Несмотря на большое количество работ по сдвигу верхней границы леса, продвижение кустарников в северной альпийской тундре было зарегистрировано только в нескольких исследованиях (Dial et al., 2007, 2016; Hallinger et al., 2010; Rundqvist et al., 2011). В основном подобные исследования проводились в арктических регионах преимущественно дистанционными методами (Van den Bergh et al., 2018; Terskaia et al., 2020).

В тундровых экосистемах увеличение покрытия территории занятой кустарниковой растительности может существенно изменить альбедо, температуру почвы, время круговорота питательных веществ, круговорот углерода и биоразнообразие, что в будущем может создать обратную связь роста кустарников и потепления в Арктике в будущем (Myers-Smith et al., 2011; Pearson et al., 2013). Таким образом, необходимо понимать темпы роста и распространения кустарников, которые занимают далеко не последнюю роль в формировании лесопокрываемых площадей.

Основными факторами в продвижении кустарниковой растительности в тундры является температура и снег. Снег - важный экологический фактор в альпийских экосистемах, который по-разному влияет на фенологию, рост и видовой состав растений.

М. Sturm с коллегами (Sturm et al., 2005) оценили влияние повышения зимних температур на продвижение кустарников за 30-летний период. Данные

их свидетельствуют о том, что зимние биологические процессы способствуют этому преобразованию посредством положительной обратной связи, которая включает в себя снегозадерживающую способность кустарников, изоляционные свойства снега, слоя почвы с высоким содержанием воды. Увеличение обилия кустарников приводит к образованию более глубокого снега, что способствует повышению зимней температуры почвы, микробной активности и большему доступу для растений азота. Высокий уровень азота в почве способствует росту кустарников следующим летом. Поскольку климатические модели предсказывают продолжающееся потепление, большие площади тундры могут покрыться кустарниками, а зимние процессы подобные описанным выше, возможно, играют в этом решающую роль.

На кустарниковую растительность большое влияние оказывает высота снежного покрова. М. Sturm в своих работах уделял особое внимание изменению снежного покрова (Sturm, 2001). По результатам исследований были выявлены высокие связи между высотой снега и количеством кустарников. Глубина снежного покрова напрямую влияет на степень промерзаемости почвы. Благодаря большей глубине снега зимняя температура поверхности почвы значительно выше, чем на малоснежных участках. Тем самым снег способствует росту и распространению кустарниковой растительности.

Во многих исследованиях активно используется метод дистанционного наблюдения при помощи спутниковых изображений. К. Таре с коллегами (Tare et al., 2006) используя более 200 старых и новых аэрофотоснимков обнаружили значительное увеличение кустарникового покрова за последние 50 лет на севере Аляски. Такие породы как ольха, ива и карликовая берёза активно заселяют тундровые биомы.

Исследования с использованием повторных фотографий и спутниковых изображений проводили и другие исследователи (Myers-Smith et al., 2011). Спутниковые наблюдения в Арктике, которые показали повышение зарастания кустарниковой растительностью, совпали с повышением температуры воздуха в высоких широтах. В наблюдаемые изменения в обилии кустарников вносят

вклад многие факторы: повышение температуры, изменение снежного покрова, изменение режимов в результате таяния вечной мерзлоты, тундровые пожары, антропогенная деятельность, активность травоядных.

Под понятием “экспансии кустарников” в большинстве работ подразумевается увеличение количества таких пород как берёза, ива, ольховник и др. Однако гораздо меньшее внимание оказывается вечнозелёным карликовым кустарникам, которые так же активно заселяют тундру. Выявлено отличие экспансии вечнозелёных кустарничков от экспансии более высоких лиственных пород. Низкий рост вечнозеленых карликовых кустарников означает, что на них вряд ли повлияет снежный покров. Эрикоидная микориза может способствовать замедлению скорости оборота органических веществ в подстилке и почве за счет образования меланизированных гиф, устойчивых к разложению, что в целом может способствовать накоплению углерода (Vowles, Björk, 2019).

## **1.2. Исследования радиального роста деревьев в горных районах**

### **Субарктики**

На ширину годовичных колец влияют разнообразные внешние факторы. Исследования, посвященные этой теме, активно проводятся как в России (Шиятов, 1986; Ваганов и др., 1996), так и за рубежом (Glock, 1941; Fritts, 1976; Schweingruber, 1996). Данные работы показали, что основными факторами, влияющими на ширину годовичных колец, являются осадки и температура. В зависимости от региона, наиболее значимым фактором может быть либо низкая летняя температура в горах и северных районах (Шиятов, 1986; Хантемиров, 1999), либо недостаток влаги в более южных и засушливых районах (Fritts, 1976; Schweingruber, 1996). Однако мнения о том, какие факторы положительно влияют на рост деревьев в верхних границах леса, расходятся. Некоторые исследователи считают, что повышение температур и увеличение осадков в летний период способствуют расширению ареала древесной растительности в горы (Woodward et al., 1995; Körner, 1998, 2003), тогда как другие полагают, что теп-

лая весна и влажное лето оказывают наибольшее влияние на смещение границы леса (Little et al., 1994).

В связи с текущим потеплением климата, особое внимание ученых привлекают лесные экосистемы Крайнего Севера (IPCC, 2021). Лесные сообщества, находящиеся на границе своего ареала, чувствительны к климатическим изменениям (Шиятов, 1986). Плато Путорана является одним из самых труднодоступных районов в России, поэтому исследования радиальных приростов лиственных древостоев здесь ограничены.

М.М. Наурзбаев и Е.А. Ваганов (Naurzbaev, Vaganov, 2000) реконструировали древесно-кольцевую хронологию для восточного Таймыра и Путорана, охватывающую период с 212 г. до н.э. по 1996 г. н.э., используя как живые деревья, так и хорошо сохранившиеся полуископаемые остатки. Они обнаружили высокие значения синхронности отдельных рядов годовых колец, что указывает на преобладающее влияние температурного фактора на изменение радиального роста деревьев.

М.М. Наурзбаев с соавторами (Наурзбаев и др., 1999) в своей работе также отмечают связи между длительными древесно-кольцевыми хронологиями севера Евразии с колебаниями глобального климата. Длительные изменения радиального прироста деревьев связаны с глобальными прошлыми изменениями климата в субарктике Евразии. Несмотря на наблюдаемое современное потепление, оно ещё не достигло уровня средневекового. Изменение температуры по древесно-кольцевым хронологиям не выявили аномального повышения температуры в последнее столетие, которое соотносится с увеличением парникового эффекта.

На плато Путорана, в верховьях озера Лама, С.М. Матвеев и Д.И. Гупалов (Матвеев, Гупалов, 2015) провели дендроклиматический анализ древостоя на склонах северной и южной экспозиций. Дендроклиматический анализ показал некоторое увеличение радиального прироста начиная с 1969 года, на фоне увеличения амплитуды и частоты колебания приростов. Главными факторами,

влияющими на формирование годичного прироста, являются максимальные температуры воздуха и сумма осадков за год.

В связи с высокой связью роста деревьев, произрастающих в экстремальных условиях, с климатическими факторами, большое внимание уделяется изучению динамики лесов (Капралов и др., 2006; Григорьев, 2011). Дендрохронологические исследования на Приполярном Урале показали, что основным фактором, ограничивающим рост лиственницы, является недостаток тепла в летний период (Шиятов и др., 1992; Ваганов, Шашкин, 2000). В пределах западного макросклона Приполярного Урала (Манов, Загирова, 2015) была выявлена высокая синхронность радиального прироста лиственничных древостоев в разных условиях местообитания. Климатический сигнал обусловлен колебаниями температур в июне-июле, тогда как осадки оказывают слабое воздействие на ширину годичных колец лиственницы.

Реакция деревьев на климат меняется в зависимости от их возраста. В горах Тянь-Шаня была проведена оценка реакции радиального роста деревьев разных классов возраста на климат (Jang et al., 2017). Несмотря на схожие корреляции с климатом, молодые деревья до 100 лет были более надежными индикаторами климатических факторов. Подобные дендрохронологические исследования проводились и в Субарктике, где у более молодых деревьев наблюдалась отрицательная тенденция в увеличении ширины годичных колец, связанная с негативным влиянием старых деревьев, в то время как старые деревья демонстрировали увеличение темпов роста с середины 1970-х годов (Devi et al., 2020).

В северных регионах, где недостаток тепла является постоянным, экспозиция играет важную роль в росте деревьев. Низкая поступающая солнечная энергия и более низкая температура воздуха сокращают вегетационный период. Наиболее заметны различия между северной и южной экспозициями. В Эвенкии был проведен сравнительный анализ радиальных приростов деревьев на разных склонах (Бенькова и др., 2015). У деревьев на склоне северной экспозиции были выявлены худшие биометрические характеристики и низкий ради-

альный прирост. Авторы связывают эти результаты с неблагоприятными термическими и почвенными условиями.

Известно, что деревья часто испытывают водный дефицит (Bigler et al., 2006). Верхняя часть кроны более подвержена водному стрессу по сравнению с другими частями дерева. При недостатке влаги это может привести к усыханию верхней части ствола (Ambrose et al., 2010). В субарктических регионах в лиственных древостоях распространена суховершинность. Однако основным фактором, влияющим на рост деревьев в мерзлотных почвах, является температура почвы (Поздняков, 1986; Абаимов и др., 1997). Из-за низких температур повышается вязкость почвенной влаги и снижается всасывающая способность корневой системы деревьев (Прокушкин и др., 2008). В результате деревья могут испытывать недостаток влаги в начале вегетационного периода, что может привести к усыханию верхней части стволов.

В Эвенкии Д.А. Машуков и В.А. Бенькова (Машуков, Бенькова, 2014) выявили связь между экспозицией и радиальным ростом лиственницы Гмелина. В качестве показателя водного дефицита был использован радиальный прирост на разной высоте стволов. Было установлено, что деревья на склоне северной экспозиции испытывали водный дефицит с середины мая до середины июня.

Внутривидовая конкуренция также является важным параметром, влияющим на рост деревьев. Исследования в юго-восточной части полуострова Таймыр показали динамику радиальных приростов лиственницы Гмелина в лесотундровом экотоне (Фахрутдинова и др., 2017). Авторы выявили, что деревья, произрастающие непосредственно на границе с тундрой, отличаются более широкими кольцами и лучшими биометрическими показателями. На границе с тундрой сформировались благоприятные условия для роста, обусловленные лучшими гидротермическими свойствами почвы.

Несмотря на множество работ, посвященных динамике древесной растительности в горах и дендроклиматическим исследованиям, в районе исследования вопрос о влиянии микроэкологических условий на рост лиственных древостоев в экотоне лес-горная тундра остается открытым. В связи с этим,

большой интерес представляет изучение данного вопроса в рамках наших исследований.

### **1.3. Исследования фитомассы деревьев и древостоев в высокогорьях**

Исследование запасов фитомассы насаждений даёт возможность оценить запасы депонирования углерода. Благодаря смещению верхней границы древесной растительности увеличивается площади насаждений, обеспечивающих длительное консервирование углерода (Бабенко, 2006; Григорьев, 2011).

Фитомасса деревьев изучается с разделением её на отдельные фракции: древесина ствола и ветвей, хвоя, кора ствола и ветвей, генеративные органы, отмершие ветви и корни (Усольцев, Нагимов, 1988). Все эти фракции деревьев принимают участие в процессах материально-энергетического обмена, однако их физическая масса, биогеоценотическая роль и экономическое значение далеко не равноценны.

Впервые в литературных источниках данные о закономерностях формирования стволовой массы деревьев появились в первой половине XIX века, о фитомассе крон – позднее в работах Гартинга и Флюри (Цит по: Нагимов, 2000). В начале зарождения нормативов по оценке нестволовых частей деревьев, их объёмы (таких как кора и сучья) было принято выражать в процентном соотношении от общего объёма стволов (Третьяков и др., 1952; и др.).

Работы, которые были направлены на исследования отдельных фракций фитомассы деревьев, активизировались с 1930-х гг. как в нашей стране (Яблочков, 1934; Коссович, 1940; Данилов, 1948; Ахромейко, 1950), так и за рубежом (Burger, 1937, 1953). В данных работах фитомасса различных частей деревьев определялась при проведении лесоводственных, физиологических и гидрологических исследований.

С середины XX века опубликовано большое количество работ в нашей стране и за рубежом, посвященных изучению влияния эколого-ценотических факторов на годовичную продукцию и фитомассу деревьев и древостоев разных пород, оценке характера перераспределения прироста органических веществ по

фракциям и изменений соотношений между массами фракций (Поздняков, 1967; Штибе, 1967; Ватковский, 1969; Луганский, Луганская, 1970; Иванчиков, 1971; Семечкина, 1978; Нагимов, 1984, 2000; Усольцев, 1988, 1998; Мамонов, 1991; Мельникова, 1993; Аткин, 1994; Луганский, Нагимов, 1994; Деменев, 1995; Нагимов, Сальникова, 1997, 1998; Сальников, 1997; Суставова, 2004; Kreutzer, 1979; Kramer, Krueger, 1981; Lehmann, Cuenter, 1985; и др.). Большую значимость имеют работы, которые связаны с изучением географических закономерностей распределения фитомассы и первичной продукции (Усольцев, 2002; Максимов, 2003; Воробьев, 2006; Норицина, 2009 и др.).

В последнее время появились работы, по оценке надземной фитомассы древостоев и углерод депонирующей способности насаждений в ЭВГДР (Фастовец и др., 2003; Богословская, 2005; Рахманов и др., 2006; Нагимов и др., 2007, 2008; Дэви, 2008).

На Северном Урале в районе г. Тылайский камень О.А. Богословская (Богословская, 2005) исследовала углерод депонирующую способность экотона верхней границы леса. По результатам исследования запасы фитомассы по высотному градиенту снижаются в 5–6 раз. При том, чистая продуктивность экосистем (NEP) снижается с 1,60 до 0,67 т га<sup>-1</sup> год, а относительная масса корней, напротив, увеличивается.

На Южном Урале изучением подземной и надземной фитомассы занимался З.Я. Нагимов с коллегами (Нагимов и др., 2007). В пределах ЭВГДР на г. Малый Ирмель было установлено, что запасы фитомассы уменьшаются с 182,3 т/га на четвертом высотном уровне до 3,4 т/га – на первом (на каждый метр высоты фитомасса уменьшается на 1,19 т/га). Доля корневых систем в общей фитомассе увеличивается с увеличением высоты над уровнем моря и составляет 20,6–30,0%. Аналогичные исследования были проведены и на Северном Урале на склоне г. Конжаковский Камень (Нагимов и др., 2008). По полученным данным общая фитомасса древостоев с увеличением высоты над уровнем моря снижается с 59,5 т/га на нижнем уровне до 3,05 т/га на верхнем (на каждые 25 м высоты на 14,1 т/га). Также уменьшается доля стволовой массы и увеличивает-

ся доля фитомассы крон и их структурных частей.

П.А. Моисеев с коллегами (Moiseev et al., 2016) изучили зависимости фитомассы деревьев от диаметра ствола на разных высотных уровнях современного экотона верхней границы леса на Южном Урале на массиве Ирмель. Была реконструирована динамика изменений структуры и фитомассы березово-еловых насаждений за последние столетия. Было выявлено, что с увеличением высоты над уровнем моря в современном экотоне границы леса доля стволов деревьев в общей надземной фитомассе ели уменьшается в 1,6–1,9 раза, а ветвей и хвои увеличивается. Надземная фитомасса древостоев на трех склонах массива Ирмель увеличилась в среднем с 0,3 до 95,8 т/га на высоте 1255–1295 м над ур. м. (современная граница сомкнутых лесов), до 45,8 т/га на высоте 1310–1335 м над ур. м. (верхняя граница редколесий) и до 4,3 т/га на высоте 1355–1365 м над ур. м. (верхняя граница редколесий).

Ф. Хагедорн с соавторами (Hagedorn et al., 2020) определили количественные показатели биомассы деревьев в экотоне лес-горная тундра в семи регионах (от Южного до Полярного Урала). На основе аллометрических уравнений 326 деревьев были получены данные фитомассы. Результаты показали снижение биомассы и продуктивности древостоев в 3–5 раз по направлению с юга на север. Продолжительность вегетационного периода сокращается на 20%, а зимние температуры снижаются на 4°C по направлению к Полярному Уралу. Широтные закономерности в биомассе и продуктивности древостоев будут влиять на ряд функций экосистем, таких как надземное и подземное разнообразие и поглощение углерода, а также на то, как они изменяются в результате изменения климата.

Исследованиями фитомассы на плато Путорана занималась А.А. Кнорре с соавторами (Кнорре и др., 2006). Были выявлены закономерности накопления фитомассы различных компонентов лесотундровой экосистемы. В северо-западной части Путорана был заложен высотный профиль юго-западной экспозиции. Была рассчитана надземная фитомасса древостоев на основе 18 модельных деревьев. Биомасса древостоя снижалась по направлению к верхней грани-

це редколесий более чем в четыре раза с 33,44 до 7,6 т./га.

На плато Пудорана подобные исследования единичны. Изучение фитомассы деревьев и древостоя позволит качественно оценить запасы, а также сравнить полученные результаты с другими регионами.

В целом, проведенный анализ литературных данных позволяет сделать заключение, что район плато Пудорана остается слабо изученным в отношении динамики верхних пределов лесов, лесоводственно-таксационной структуры древостоев и формирования их надземной фитомассы в ЭВГДР.

## Глава 2. Природно-климатические и техногенные условия района исследования

### 2.1. Географическое положение района исследования

Плато Путорана – сильно расчленённый горный массив, расположенный на северо-западе Среднесибирского плоскогорья, и являющийся самой высокой его частью. Площадь провинции Путорана составляет около 284 000 км<sup>2</sup>. Ближайшими населёнными пунктами являются город Норильск и посёлки Талнах Каеркан, располагающиеся в 150 км от плато. Административно плато занимает территорию Таймырского, Долгано-Ненецкого и Эвенкийского муниципальных районов Красноярского края (рис. 2.1).

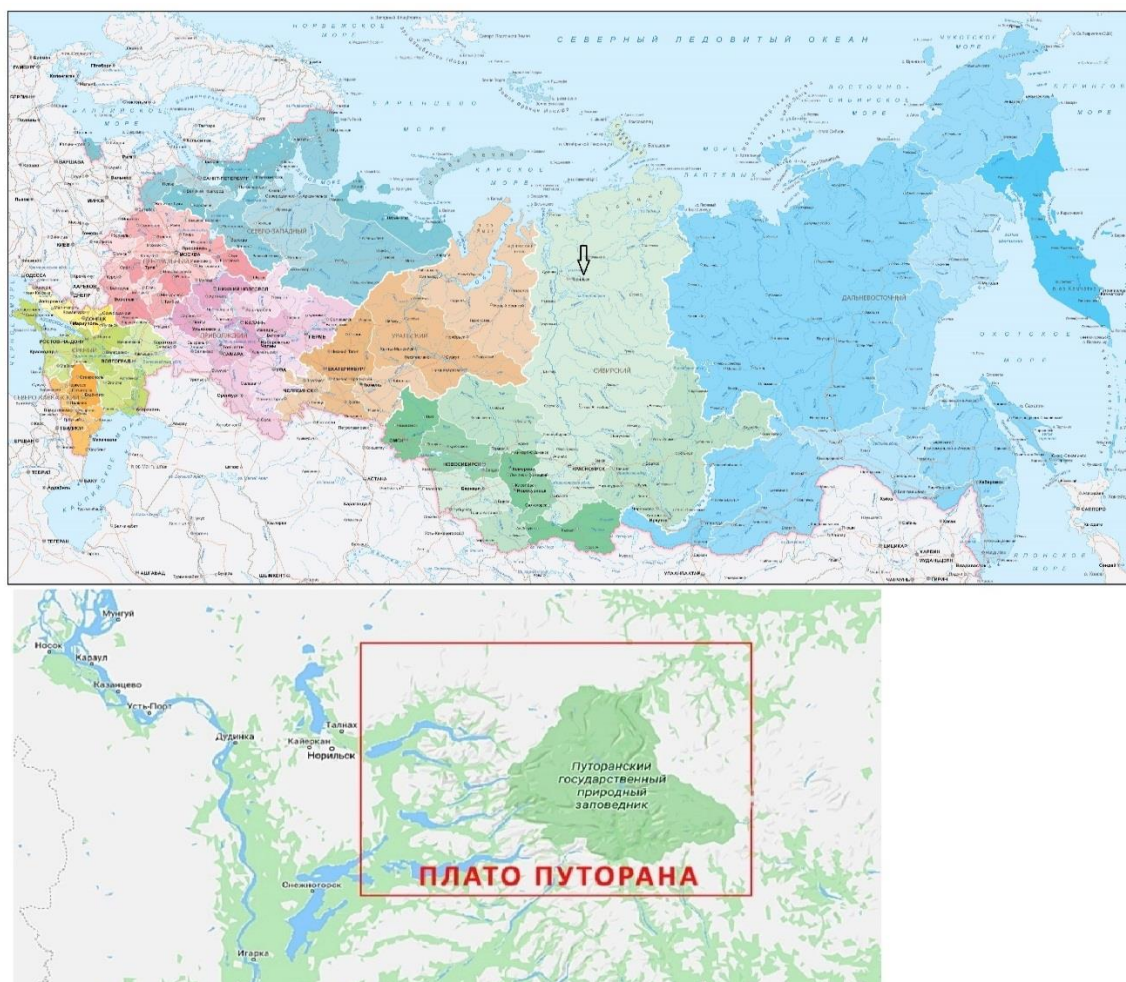


Рисунок 2.1. – Район исследования на карте Российской Федерации

Средняя высота гор в районе варьирует от 900 до 1200 м, увеличивается к центральной части, и достигает максимума с отметкой – 1701 м. Базальтовое плато на севере, западе и востоке обрывается резкими уступами до 300-500 м к Западно-Сибирской и Северо-Сибирской низменностям и к известняковому Котуйскому плато.

Районом исследований был выбран горный массив Сухие горы, расположенный в северо-западной части плато Путорана на левом берегу озера Лама (66.446<sup>0</sup> с.ш., 90.523<sup>0</sup> в.д.; 66.340<sup>0</sup> с.ш., 90.946<sup>0</sup> в.д.)

## 2.1. Климат

Плато Путорана расположено за Северным полярным кругом. Южная граница плато граничит с полярным кругом. Север плато относится к Средне-Сибирской подобласти Сибирской области Субарктического климатического пояса (Алисов, 1956). До 94° в.д. горный массив регулярно подвергается воздействию атлантических циклонов. Летний сезон отличается интенсивной солнечной радиацией из-за продолжительного полярного дня, способствующего преобразованию арктических воздушных масс в континентальный воздух умеренных широт.

Согласно данным метеостанций (Справочник..., 1967), на северо-западе плато, где ранее располагалась исследовательская станция «Путорана», зафиксированы среднегодовые температуры от -9,3 до -10,2°C. Январь является самым холодным месяцем с температурой -25,8 – -30,1°C, а июль – самым тёплым с температурой воздуха 12,3 – 13,7°C. Период с положительными среднесуточными температурами длится 108-125 суток. Приход весны наступает в конце мая- начале июня. Короткий летний сезон (с температурой выше 10°C) длится с конца июня по середину августа. Длительность периода составляет 45-55 дней. В летние месяцы с увеличением высоты над уровнем моря среднемесячные значения температур понижаются на 0,5 – 0,7°C на каждые 100 м высоты (Справочник..., 1967).

Среднегодовое количество осадков по данным метеостанции Норильск 420 мм, а по данным метеостанции Лама – 547 мм; половина всех осадков приходится на 4 месяца тёплого периода года. Однако в гольцовом поясе данная величина, скорее всего, значительно выше вследствие вертикального (плювиометрического) градиента жидких осадков. Е.А. Попов и Ю.П. Пармузин (Попов, Пармузин, 1975) полагают, что в горных частях на высоте 500-1500 метров среднегодовые суммы осадков должны быть не менее 1000-1100 мм.

## 2.2. Рельеф

Плато Путорана занимает часть Тунгусской синеклизы Сибирской платформы. На кристаллическом основании залегает осадочная песчано-глинистая толща палеозойских пород с угленосными горизонтами, перекрытая верхнепермскими и нижнетриасовыми базальтами (траппами). Максимальная мощность траппов 1,5-2 км (Иванов, 1983)

Положение гор Путорана на периферии климатической области, а также на стыке тектонических структур, обуславливающих резкую разницу в рельефе, определяют своеобразие почвенно-растительного покрова. Путорана относится к зоне тундролесий Средней Сибири, но в западной части имеет многие черты, наиболее характерные для Западной Сибири (Пармузин, 1960).

Характерная особенность рельефа плато Путорана – это ступенчатость. Наибольшая часть ступеней обусловлена литоморфными свойствами траппов. (Иванов, 1983). Накопленные массы базальтов образуют мощный покров на Путорана. Базальты образуют уступы, а различные туфы, туфобрекчии подвержены разрушению и создают различные площадки. Литоморфная ступенчатость обусловлена чередованием разных по твёрдости пластов.

На плато Путорана насчитывается до 20-30 ступеней. Столбчатые отдельности, образовавшиеся в результате выветривания базальтов, распадаются на плитчатые и глыбовые отдельности, которые при разрушении, образуют каменные россыпи, курумы, осыпи и развалы.

Помимо ступенчатости, к характерным особенностям, можно отнести большое количество продольных борозд (делли). Вода в деллях появляется только после дождя.

Рельеф верхней части склона плато постоянно обновляется, уступы террас представляют собой неустойчивые осыпи крутизной от 40 до 50°

Подгольцовые ландшафты Путорана представлены в целом очень узкой полосой, занимающей крайне небольшую площадь. Это связано с тем, что подгольцы Путорана занимают зону перегиба трапповых склонов, резкого из перехода в горизонтальные поверхности плато (Куваев, 1980)

Вокруг оз. Лама в нижней части гор погребены, изредка обнажены малоустойчивые осадочные породы: алевролиты, аргиллиты, песчаники, угли. Из этих пород состоят пологие предгорья под шлейфом снесенных из скал обломков траппов. На пляжах наблюдаются в большей своей массе обломки базальта и габбро. Среди них присутствуют различные постмагматические минералы кварц, кальцит, пренит (Янченко, 2010).

### 2.3. Почвы

Почвы плато Путорана имеют большое своеобразие. Сочетание таких факторов как холодный климат, горный рельеф, тундровая растительность, базальтовые породы, создают специфические условия почвообразования (Соколов, 1975). Путоранская горная почвенная провинция входит в состав северотаёжной подзоны глеево-мерзлотно-таёжных почв Восточно-Сибирской мерзлотно-таёжной области (Соколов, 1975). Почвообразовательные процессы развиваются при наличии многолетней мерзлоты. Имеют отрицательную температуру на протяжении 8-9 месяцев в году (Норин, 1986). Горизонт вечной мерзлоты расположен в толще коренных базальтовых пород. Почвообразующие породы в горах представлены в основном грубоскелетным элювием и делювием коренных пород. В данных условиях одним из ведущих почвообразовательных про-

цессов является процесс внутрипочвенного выветривания (Макеев, Ногина, 1958).

**Почвы лесного пояса.** Под лиственничными лесами северной тайги формируются мерзлотно-таёжные почвы (Классификация почв СССР, 1977). Различают две группы: криоглееземы и криоземы (Игнатенко, 1979)

**Почвы редколесий и редины горно-лесного пояса.** И.А. Соколовым (1976) был предложен термин “охристые подбуры”. К специфическим признакам охристых подбуров относят: 1. Крайне малая мощность почвенного профиля; 2. Исключительно высокое накопление аморфных органо-минеральных соединений; 3. Насыщенность и слабокислая реакция среды нижних горизонтов. По мнению И.А. Соколова (1975) охристые подбуры обладают высокой климатической сенсорностью и могут с успехом использоваться как зонально индикаторные почвы.

**Почвы подгольцового пояса.** В зарослях ольхи кустарниковой (*Duschekia fruticosa* (Rupr.) Pouzar), а также в лиственничных редилах подгольцового пояса широко распространены неоподзоленные каменистые маломощные почвы – горные подбуры. Особенность их формирования связана с хорошим дренажем, который обусловлен крутизной склонов и сильной щебнистостью почвы (Норин, 1986). На более крутых склонах (от 18 до 35 град.) тёмные подбуры характеризуются очень небольшой мощностью горизонтов  $A_0$  и  $A_1$ .

## 2.4. Гидрография

Речная сеть очень густая. Реки многоводны, глубоко врезаются в базальтовый покров, изобилуют порогами и водопадами. Речная сеть относится к трём основным бассейнам: Енисею, Пясине и Хатанге (Пармузин, 1975). Всего в районе насчитывается 188 рек длиной более 10 км, а их общая протяжённость составляет почти 4000 км. Из них самые длинные реки – Микчанда (приток оз. Лама), которая имеет протяжённость 122 км, а также Рыбная с протяжённостью 106 км. У большинства рек района отсутствует выраженная пойма. Также ха-

раκτηрной особенностью рек является образование обширных дельт (Михайлов, 1947).

Из-за большой расчленённости и влажности западная часть Путорана изобилует наиболее крупными и глубокими озёрами, многие из которых имеют ледниковое происхождение. Озёрность бассейнов свыше 10%. Основными составляющими водного баланса являются приток поверхностных вод (как талых, так и дождевых) и испарение. Наибольшее количество озёр сосредоточено в юго-западной и западной части плато. Глубина большинства озёр может достигать 200-300 м. Крупнейшие из них – Лама, Кета, Глубокое, Мелкое, Собачье и Хантайское. Озеро Лама является одним из самых глубоких озёр плато Путорана. Оно находится в тектонической впадине и имеет вытянутую форму. Максимальная глубина зафиксирована на отметке 254 м. (Белых, 1940). Площадь бассейна озера составляет 6720 км<sup>2</sup>.

По данным исследователей (Воронов, Кулаков, 1958; Пармузин, 1960) гидрография и орография плато Путорана напрямую отражают его систему тектонических разломов и сводовое воздымание.

## **2.5. Растительный покров**

Растительный покров плато Путорана формируется под влиянием его географического положения. Высотная дифференциация рельефа определяет выраженную вертикальную поясность с возрастанием высотных границ в направлении центральной части плато. Древесная растительность, а также субальпийские кустарниковые сообщества распространены преимущественно в зонах тектонических разломов, с закономерным сокращением их площади к центральным районам (Пармузин, 1964). В исследуемом регионе выделяются три высотных пояса: северотаёжный (лесной), подгольцовый и гольцовый (горно-тундровый). Северотаёжный пояс занимает высоты от 50–60 до 200–250 м над у.м. на склонах северной экспозиции и до 450–500 м над у.м. на южных склонах. Подгольцовый пояс простирается до 500–600 м на северных и 600–650 м на южных склонах, выше которых доминируют горные тундры (Норин, 1986).

В северотаёжном поясе преобладают кустарничковые зеленомошные лиственничники (*Larix gmelinii* (Rupr.) Rupr. и *Larix sibirica* Ledeb.), приуроченные к умеренно увлажнённым склонам на разных экспозициях. Также в древостое отмечается примесь *Betula pubescens* Ehrh. и ель *Picea obovata* Ledeb. Средние значения сомкнутости крон варьируют в пределах 0,3–0,5. Высота лиственничных древостоев составляет 14–18 м. В кустарничковом ярусе доминируют *Vaccinium vitis-idaea* L., *Vaccinium uliginosum* L. и *Ledum palustre* L. На северо-западе плато развит густой подлесок из *Duschekia fruticosa* (Rupr.) Pouzar. с высотой 3–5 м. и сомкнутостью до 0,5–0,6, с единичным участием *Juniperus sibirica* Burgsd. и *Salix phylicifolia* L. Верхние границы распространения *Duschekia fruticosa* Rupr. характеризуются мозаичным распределением “языками” в складках рельефа, где аккумулируется влага летом и формируется мощный снежный покров зимой. Гигрофитные биотопы (поймы ручьёв, подножия склонов) заняты травяными лиственничниками с участием *Picea obovata* Ledeb. и *Betula pubescens* Ehrh. с сомкнутостью крон 0,5–0,7 и высотой лиственницы до 20–22 м.

Подгольцовый пояс доминируется зарослями *Duschekia fruticosa* Rupr. На северных склонах они образуют сплошную полосу между таёжным и гольцовым поясами. Структурно выделяются кустарничковые (*Vaccinium uliginosum* L.) и ерниковые (*Betula nana* L.) сообщества с фрагментарным мохово-лишайниковым ярусом. На южных и западных склонах формируются комплексы из *Duschekia fruticosa* Rupr., *Betula nana* L. и горно-тундровых группировок (Пармузин, 1959).

Выше подгольцового пояса распространены крупнокаменистые осыпи и скальные обнажения, обусловленные увеличением крутизны склонов. Тундровые массивы на плато (950–1000 м над у.м.) отличаются экстремальными условиями: маломощным снежным покровом, низкими температурами, ветровой эрозией и каменистыми субстратами. Доминантами выступают *Dryas octopetala* L., *Cassiope tetragona* (L.) D. Don, *Carex bigelowii* Torr. ex Schwein, ssp. *arctisibirica* Jurtzev, *Salix pseudopolaris* Flod. Верхняя граница леса во многом опре-

деляется влажностью климата: на влажном западе она опускается до 600–700 м (юг) и 200–400 м (север), тогда как на континентальном востоке поднимается до 750–800 м (юг) и 500–550 м (север). Максимальные значения отмечены на инсолируемых южных склонах, в то время как на участках с каменистыми россыпями граница снижена на 100 м. В северных районах (оз. Боковое) лесной пояс отсутствует. На периферии плато нижняя граница леса сопряжена с зональной растительностью: на севере – с лесотундрой, на юге – с таёжной зоной. Западно-восточный градиент выражен в изменении состава древостоя и травяно-кустарничкового яруса. Большая часть плато относится к подзоне северной тайги на границе Западной и Восточной Сибири (Пармузин, 1959).

## 2.6. Техногенные условия

Плато Путорана находится в 100 км от Норильска. Норильск является одним из самых загрязнённых городов на планете (Лобковский, Лобковская, 2015).

На норильском горно-металлургическом комбинате производство меди и никеля сопровождается выбросами в атмосферу тяжёлых металлов и сернистых соединений. Наибольшее количество серы (около 96%) поступает в виде  $\text{SO}_2$ . Средняя эмиссия  $\text{SO}_2$  в атмосферу составила 1,86 млн т./га (Рапута и др., 2019).

В зоне действия комбината “Норильский никель” была произведена оценка экологического состояния почв (Яковлев и др., 2008). На территории, расположенной до 4 км от города, наблюдалось высокое содержание тяжёлых металлов, отсутствие древесной растительности и нарушением минерализации органического вещества, что соответствует 5 уровню потери качества окружающей среды. Почвы, расположенные в зоне 16-25 км от города, характеризуются повышенным содержанием кислоторастворимых и подвижных соединений металлов без превышения ПДК, что соответствует 3 уровню потери экологического качества. А на расстоянии 25 км от города Норильска экологическое состояние приравнивается ко 2 уровню.

В районе плато Путорана проводились исследования по анализу экологической обстановки в связи с аэротехногенным воздействием Норильского горно-металлургического комбината. Была произведена оценка динамики состояния лесов за последние десятилетия в полосе от непосредственной близости до 200 и более километров от комбината с учетом ландшафтной структуры территории (Зиганшин и др., 2011).

Авторами было установлено, что в окрестностях озера Ламы, в елово-лиственнично-березовых насаждениях южного склона, расположенном в 80 км восточнее Норильска наблюдается древостой без признаков повреждений. Местообитание по большей части находится вне зоны влияния эмиссий НГМК. Летом 1991 г. у деревьев не было отмечено признаков повреждения листового аппарата (некрозов). Рост деревьев находится в пределах нормы, подстилка не обогащена техногенными загрязнителями.

#### Выводы:

1. Плато Путорана является единственным крупным участком, который полностью сложен из базальта. Это второе по величине трапповое плато в мире. Высота плато достигает 1700 м. Одной из особенностей плато является его ступенчатость, которая насчитывает до 30 ступеней.

2. Климат на плато Путорана эксцессивно-континентальный. Амплитуда абсолютных температур может достигать 100° (от -68°С зимой до + 30°С летом). Средняя температура самого холодного месяца – января составляет -25,8 – -30,1°С, а самого тёплого июля 12,3 – 13,7°С. Количество осадков на плато Путорана значительно превосходит весь север Восточной Сибири и в районе оз. Лама составляет 547 мм.

3. Характерная особенность рельефа плато Путорана – это ступенчатость. Наибольшая часть ступеней обусловлена литоморфными свойствами трапов. Количество ступеней может достигать до 20-30 шт. Столбчатые отдельности, образовавшиеся в результате выветривания базальтов, распадаются на плитчатые и глыбовые отдельности, которые при разрушении, образуют каменные россыпи, курумы, осыпи и развалы.

4. Путоранская горная почвенная провинция входит в состав северотаёжной подзоны глеево-мерзлотно-таёжных почв Восточно-Сибирской мерзлотно-таёжной области. Почвообразующие породы в горах представлены в основном грубоскелетным элювием и делювием коренных пород. В данных условиях одним из ведущих почвообразовательных процессов является процесс внутрипочвенного выветривания.

5. Гидрография и орография Путорана напрямую отражают его систему тектонических разломов и сводовое воздымание. Реки, истоки которых расположены в центральной части плато относятся к трём речным бассейнам: Енисейскому, Пясинскому и Хатангскому. Западная часть Путорана изобилует наиболее крупными и глубокими озёрами, многие из которых имеют ледниковое происхождение.

6. В северотаёжном поясе площади заняты кустарничковыми зеленомошными лиственничниками (*Larix gmelinii* (Rupr.) Rupr. и *Larix sibirica* Ledeb), которые предпочитают умеренно влажные склоны различных экспозиций. В западной части плато Путорана древесная растительность поднимается до 600-700 м над ур. м. Древесная растительность подгольцового пояса представлена в основном одной лесообразующей породой - *Larix gmelinii* (Rupr.) Rupr. Кустарниковая растительность представлена такими видами как *Vaccinium vitis-idaea* L., *Vaccinium uliginosum* L. и *Ledum palustre* L. На крутых склонах могут расти такие кустарники как *Duschekia fruticosa* (Rupr.) Pouzar, который характерно заселяется “языками” в складках, где скапливается влага. Также на каменистых и сухих склонах встречаются заросли можжевельника (*Juniperus sibirica* Burgsd) и *Betula nana* L.

7. Плато Путорана является одним из самых экологически чистых регионов мира. Благодаря своей удалённости от промышленных центров (в том числе и от комбината “Норильский никель”), а также труднодоступностью здесь сохранились уникальные экосистемы.

### **Глава 3. Программа, объект, методика исследований и объем выполненных работ**

#### **3.1 Программа исследований**

В соответствии с целью исследований решались следующие программные задачи:

1. Изучение и анализ специальной литературы по теме диссертации.
2. Анализ изменения климата по данным ближайших к району исследований метеостанций.
3. Закладка высотных профилей и пробных площадей в ЭВГДР на склонах различных экспозиций; определение возраста и морфометрических показателей деревьев на пробных площадях.
4. Оценка локальных условий местопроизрастания лиственницы на опытных объектах (пробных площадях).
5. Построение древесно-кольцевых хронологий ШГК и оценка влияния на радиальный прирост деревьев экспозиции склона и высоты над уровнем моря.
6. Выявление особенностей формирования лиственничников на склонах различной экспозиции с учетом периодов появления деревьев.
7. Оценка возрастной структуры древостоев лиственницы на основе особенностей распределения деревьев по возрасту.
8. Изучение особенностей дифференциации и распределения деревьев лиственницы по диаметру и высоте.
9. Исследование взаимосвязей между таксационными показателями деревьев лиственницы.
10. Установление зависимостей весовых показателей деревьев от их диаметра.
11. Оценка запасов надземной фитомассы и депонированного углерода в исследуемых лиственничниках.

### 3.2 Объект исследований

Объектом исследования являлись насаждения лиственницы Гмелина (*Larix gmelinii* (Rupr.) Rupr.), произрастающие на склонах различных экспозиций массива Сухие горы плато Путорана. На каждом склоне исследованиями охвачены древостои лиственницы, произрастающие в ЭВГДР, и древостои, расположенные ниже и непосредственно примыкающие к данному экотону. Наиболее четкое и объективное определение ЭВГДР дано исследователями высокогорных лесотундровых и лесных сообществ П.Л. Горчаковским и С.Г. Шиятовым. Под ЭВГДР они считают переходный пояс растительности в высокогорьях между верхней границей распространения сомкнутых (сплошных) лесов и верхней границей распространения отдельных деревьев в горной тундре (Горчаковский, Шиятов, 1985; Шиятов, 2009). Данный экотон указанные авторы делят на три части (полосы): отдельных деревьев (занимающую верхнее положение в экотоне), лесных микрогруппировок или редиин (занимающую среднее положение) и редколесий (занимающую нижнее положение). При выделении этих частей, как правило, используется такой показатель, как сомкнутость крон (полога). В частности, в высокогорьях к рединам относят растительные сообщества, в которых сомкнутость крон древесного яруса составляет менее 0,1, а к редколесьям – сообщества с сомкнутостью полога 0,1-0,3 (Демьянов, 1977; Норин, 1979; Горчаковский, Шиятов, 1985).

### 3.3 Методика исследований

В основу исследований положен метод высотных профилей и пробных площадей (Шиятов, 2009). Под высотным профилем считался вертикальный профиль рельефа вдоль условной линии, проходящей в пределах экотона от сомкнутых лесов до отдельных деревьев в горной тундре. Он позволяет фиксировать расстояния и высоты над уровнем моря при движении вдоль линии профиля.

Для закладки профилей маршрутным обследованием территории подбирались склоны различных экспозиций (западной, восточной, южной и север-

ной), включающие указанные выше части ЭВГДР. Одним из главных условий при подборе участков являлось отсутствие повреждений у деревьев энтомо вредителями, пожарами, болезнями и другими факторами.

На каждом выбранном склоне закладывался один высотный профиль, строго ориентированный по направлению от сомкнутого леса к горной тундре. Таким образом, научно-исследовательский стационар в горном массиве Сухие горы включал 4 высотных профиля: западный, восточный, южный и северный. Территориальное размещение их показано на рис. 3.1.

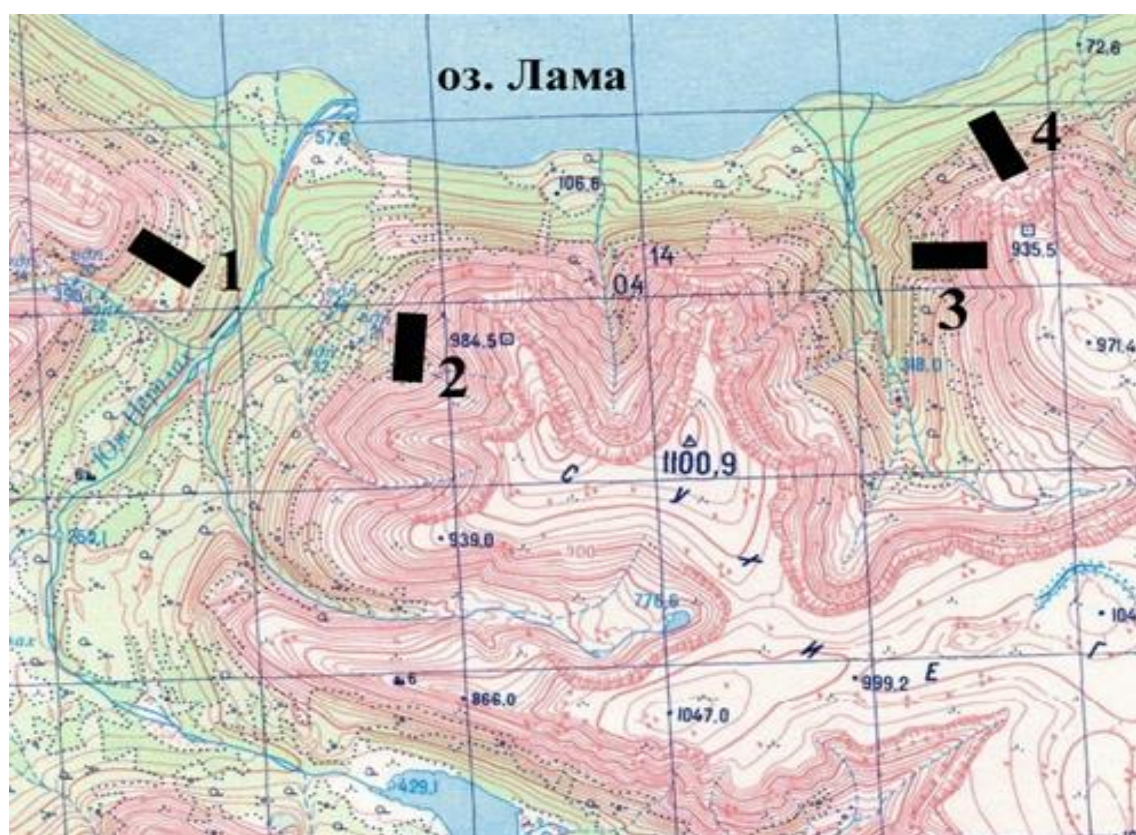


Рисунок 3.1. – Размещение высотных профилей в горном массиве Сухие горы:

1 – восточный профиль; 2 – южный профиль; 3 – западный профиль; 4 – северный профиль

На каждом профиле фиксировались четыре высотных уровня: 1-й уровень – в ЭВГДР в полосе реди́н; 2-й – в ЭВГДР в полосе редколесий, 3-й – у верхней границы сомкнутого леса и 4-й – в глубине сомкнутого леса (рис. 3.2).

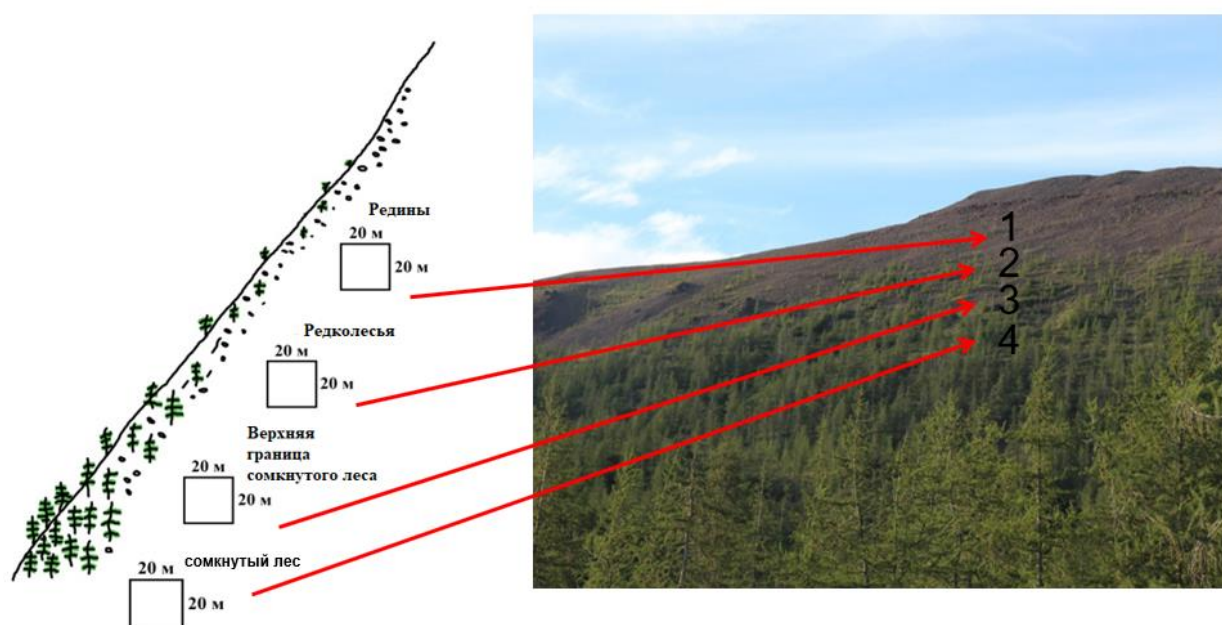


Рисунок 3.2. – Схема размещения высотных уровней на профиле

Абсолютные высоты высотных уровней наибольшими значениями характеризуются на более прогреваемых южном (от 515 до 604 м н.у.м) и западном (от 458 до 650 м н.у.м) склонах, а наименьшими – на менее прогреваемом северном склоне (от 204 до 335 м н.у.м.). Высотные уровни восточного склона по абсолютным отметкам (от 358 до 620 м н.у.м.) занимают промежуточное положение: они заметно выше уровней северного склона и ниже уровней южного и западного склонов (табл. 3.1.).

Протяжённость экотона по направлению от сомкнутого леса к горной тундре (следовательно, и высотных профилей) также зависит от экспозиции склона. Она на южном склоне является самым коротким и составляет 184 м. Наибольшей протяжённостью экотона характеризуется склон восточной экспозиции (506 м). Северная и западная склоны по этому показателю занимают промежуточное положение: на первом она составляет 233 метров, а на втором - 383 м. Такое положение объясняется методикой фиксации высотных уровней и характером рельефа местности. Как отмечалось выше, высотные уровни выделяются с учетом сомкнутости крон (густоты) древостоев. Поэтому из-за раз-

Таблица 3.1 – Географические координаты и основные геоморфологические характеристики исследованных участков склонов

| Высотный уровень | Экспозиция | Крутизна склона, град. | Высота над ур.м., м | Географические координаты, град. |            |
|------------------|------------|------------------------|---------------------|----------------------------------|------------|
|                  |            |                        |                     | С.Ш.                             | В.Д.       |
| 1                | В          | 35                     | 620                 | 69.400010                        | 90.667011  |
| 2                | В          | 21                     | 458                 | 69.400011                        | 90.683001  |
| 3                | В          | 35                     | 413                 | 69.400010                        | 90.683003  |
| 4                | В          | 31                     | 358                 | 69.400009                        | 90.683004  |
| 1                | Ю          | 21                     | 604                 | 69.383016                        | 90.750002  |
| 2                | Ю          | 33                     | 586                 | 69.383014                        | 90.750003  |
| 3                | Ю          | 32                     | 563                 | 69.383015                        | 90.750001  |
| 4                | Ю          | 26                     | 515                 | 69.383014                        | 90.733.017 |
| 1                | З          | 27                     | 650                 | 69.407017                        | 90.889067  |
| 2                | З          | 30                     | 579                 | 69.40805                         | 90.885933  |
| 3                | З          | 34                     | 500                 | 69.407633                        | 90.882883  |
| 4                | З          | 29                     | 458                 | 69.407467                        | 90.87995   |
| 1*               | С          | 47                     | —                   | —                                | —          |
| 2                | С          | 26                     | 335                 | 69.415617                        | 90.8983    |
| 3                | С          | 30                     | 258                 | 69.416833                        | 90.896067  |
| 4                | С          | 21                     | 224                 | 69.417067                        | 90.895367  |

личной освещенности и теплообеспеченности склонов, их крутизны и ступенчатости, границы перехода полосы редин к полосе редколесий и полосы редколесий к полосе сомкнутого леса могут находиться на различном расстоянии друг от друга. Крутизна склонов варьируется от 21 до 47 градусов.

На северном склоне высотный профиль заканчивается у верхней границы редколесий. Выше этой границы, вследствие высокой крутизны склона, древесная растительность, соответствующая по сомкнутости крон к редицам, не обнаружена. Поэтому по этому профилю данные для первого уровня в табл. 3.1. не приведены.

На рис. 3.3., в качестве примера, показан один из участков закладки высотного профиля.

На каждом высотном уровне южного и западного профилей закладывались не менее трех пробных площадок размером 20х20 в соответствии с методикой международного проекта ИНТАС-01-0052. Они размещались на одинаковом расстоянии друг от друга. Углы и центры пробных площадей на местно-



Рисунок 3.3 – Участок склона для закладки высотного профиля

сти закреплялись кольями высотой до 1,5 м или пирамидками из камней.

На втором и третьем высотных уровнях восточного профиля квадратные пробные площадки были заменены круговыми площадками постоянного радиуса (радиус равнялся 8 метрам). В центре таких пробных площадей устанавливался кол высотой до 1,5 м. На первом и четвертом высотных уровнях данного профиля исследования проводились на пробных площадях квадратной формы размером 20х20 метров. На северном склоне были заложены полигоны четырёхугольной формы: на втором и третьем высотных уровнях размером 0,15 га., а на 4 уровне - размером 0,1 га. Углы и центры полигонов также закреплялись кольями.

С помощью GPS навигатора определялись их координаты, а также высота над уровнем моря. Географические координаты центра пробной площади определяли при помощи GPS-приемника Etrex 10 (Garmin Inc., Schaffhausen, Switzerland).

На каждой пробной площади выполнялась подеревная (индивидуальная)

таксация с нумерацией деревьев и фиксацией их месторасположения. Определение местоположения деревьев производилось при помощи угломерного инструмента, который устанавливался на середине пробной площади. Для этого определялись азимуты (румбы) и длины линий, соединяющих окружающие (пронумерованные) деревья с вертикальной осью прибора.

В ходе таксации для каждого растения определялись порода, возраст (возрастным буравом), размеры ствола (общая высота, таксационный диаметр и диаметр у основания), а также диаметр кроны в двух взаимно-перпендикулярных направлениях. Высота крупных деревьев устанавливалась с использованием высотомера Suunto, а высота небольших экземпляров – при помощи мерной ленты (рулетки) или мерного шеста.

Возраст деревьев определялся на основе установления даты их появления. С этой целью у всех растущих деревьев лиственницы толщиной более 3 см возрастным буравом извлекался керн на высоте 20–30 см (рис. 3.4), а у усохших выпиливался диск у основания ствола (рис. 3.5).

У каждого второго растения высотой более 20 см, но диаметром менее 3 см были взяты спилы на уровне корневой шейки и определены высоты с точностью до 1 см. Возраст их определялся по числу годовичных колец на спилах. Растения высотой менее 20 см учитывались по методике, применяемой для оценки подроста.

Для транспортировки в лабораторию буровые образцы и спилы помещались в бумажные или полиэтиленовые контейнеры с этикетками. На этикетке указывались номер профиля, номер пробной площади, вид и номер дерева, а также высоту отбора образца.

В лабораторных условиях керны наклеивались на специальную деревянную рейку, затем их поверхность тщательно зачищалась бритвой. Для увеличения контрастности колец в зачищенную поверхность керна втирался зубной порошок. Подсчёт годовичных колец производился на полуавтоматической установке Lintab 5 (рис. 3.6).



Рисунок 3.4. – Отбор образцов (керна) древесины возрастным буравом



Рисунок 3.5. – Выпиленный диск у основания ствола



Рисунок 3.6 – Подсчёт годичных колец на полуавтоматической установке Lintab – 5

В случаях, когда керн достигал центра ствола, возраст дерева на высоте отбора керна определялся как разность между календарным годом взятия образца и годом образования самого старого годичного кольца. Если же керн в результате каких-то причин (эксцентричности нарастания древесины, наличия участков гнили и др.) не достигал центра, то вначале устанавливалась длина недоступного для подсчета годичных колец отрезка древесины. Она определялась по радиусу трафарета окружности, с которой совпадает форма дуги, образуемой самыми старыми годичными слоями керна. При этом использовалась специально изготовленная прозрачная палетка с нанесенными линиями окружностей разного размера. Затем рассчитывалось количество годичных колец на данном отрезке древесины. Оно принималось равным числу самых старых годичных колец, умещающихся на отрезке керна длиной, равной установленной длине недоступного для анализа участка древесины.

При подсчете и датировке годовых колец на кервах и дисках возможны ошибки из-за их выпадения. Поэтому при перекрестной датировке использовалась мастер-хронология – графики погодичного изменения индексов радиального прироста исследуемого района для лиственницы Гмелина продолжительностью 300 лет, построенные по 40 кервам, взятым у наиболее старых растений в районе исследований.

Окончательно возраст деревьев диаметром более 3 см определялся суммированием годовых колец, определенных по керну (на высоте 20-30 см) с возрастом, в котором они достигли высоты отбора кернов. Для определения второго показателя по данным растений, у которых были взяты спилы на уровне корневой шейки и измерены высоты, разрабатывались уравнения регрессии между этими показателями. По уравнениям рассчитывался возраст достижения каждым обследованным и пробуренным деревом высоты отбора образцов.

Возраст растений, определенный по изложенной методике, нельзя считать установленным с точностью до одного года. Однако, на наш взгляд, он является наиболее реальным и позволяет решить поставленные задачи исследования.

Для определения таксационных показателей и фитомассы древостоев в 2017 году научной бригадой лаборатории дендрохрологии ИЭРиЖ УРО РАН с участием автора за пределами пробных площадей производился отбор, рубка и обмер модельных деревьев. Полученные данные были предоставлены нам для расчета запасов фитомассы и аккумулированного в ней углерода. Данная работа производилась по следующей методике.

Модельные деревья отбирались по всему диапазону варьирования диаметров без предварительного определения размеров. При этом стремились брать деревья из самой тонкой и самой толстой ступеней толщины.

С учетом запланированного определения фитомассы отбор и обмер модельных деревьев осуществлялся не раньше середины июля, т.е. после полного формирования хвои (листьев) текущего года и стабилизации влажности фрак-

ций. Перед рубкой у каждого дерева определялись диаметр, категория качества, класс Крафта, форма и диаметр проекции кроны.

Известно, что при падении дерево может потерять часть кроновой массы или, наоборот, пополниться ветками соседних деревьев. Чтобы этого не допустить, тщательно выбиралось направление валки, расчищалось место падения дерева и на расчищенное место расстилался брезент или полиэтиленовая пленка.

Срубленные модельные деревья служат основой не только для определения фитомассы, но и других таксационных показателей древостоев. Поэтому после их рубки осуществлялись следующие операции. Измерялись общая длина ствола и кроны. На середине двухметровых (метровых) секций, а также на относительных высотах производилось определение диаметра ствола в коре и без коры. Возраст устанавливался путем подсчета годовичных слоев на пне. Определение расчетных таксационных показателей модельных деревьев производилось общепринятыми в лесной таксации методами.

Свежесрубленная фитомасса стволов определялась непосредственным взвешиванием. При этом по отметкам на серединах двухметровых (метровых) секций стволы распиливались на отрубки-секции (рис. 3.7), которые затем взвешивались на электронном безмене с точностью  $\pm 50$  г.



Рисунок 3.7 – Распиленный на метровые отрезки ствол лиственницы

Опилки, получаемые при распиловке, прибавлялись к соответствующим отрубкам. Для определения содержания коры и абсолютно сухого вещества в древесине и коре на серединах двухметровых (метровых) секций, у основания ствола и на конце последней секции выпиливались диски. Древесина и кора с дисков в лесу взвешивались с точностью до 0,1 г, затем в лабораторных условиях высушивались в термостатах при температуре 100-105°C до постоянного веса. По результатам взвешивания древесины и коры дисков до и после сушки определялось содержание абсолютно сухой массы этих фракций в сырой навеске и в целом для ствола. Содержание коры и абсолютно сухого вещества в древесине и коре меняется с высотой дерева. Поэтому в расчетах использовались предварительно выровненные показатели – содержание коры и абсолютно сухого вещества в древесине и коре выравнивались графически в зависимости от высоты ствола. С выровненных линий снимались средние значения этих показателей для середин отрубков.

После обрубки веток непосредственным взвешиванием их на электронном безмене с точностью до 50 г. определялась общая фитомасса кроны на модельных деревьях. Расчленение кроны на составные элементы – хвою и ветви (скелет кроны) производилось после формирования выборки модельной части кроны. Для этого крона делилась по вертикали на три одинаковые по длине слоя. Из каждого слоя отбирались средние по размеру ветви количестве 1-3 шт. (в зависимости от величины кроны). Затем модельная часть кроны (отобранные ветви) взвешивалась с точностью до 5 г. и делилась на следующие фракции: ветви (скелет кроны), отмершие ветви, генеративные органы и хвоя. После этого устанавливался вес каждой из этих фракций в модельной части кроны и по полученным соотношениям определялась их фитомасса в общей массе кроны. Отмершие ветви до кроны собирались и взвешивались отдельно.

У деревьев из маломерных ступеней толщины хвоя отделялась со всей кроны. Это связано с тем, что в этом случае время на отделение всей хвои не превышает суммарного времени на формирование модельной части кроны и ее ручной обработки у средних и крупных деревьев.

Для установления влажности и абсолютно сухого веса хвои и ветвей отбирались их образцы, которые сразу же взвешивались с точностью до 0,1 г. В лабораторных условиях образцы древесины и коры ветвей, а также хвои высушивались в термостатах до постоянного веса. По результатам сушки на основе соответствующих расчетов определялось содержание абсолютно сухой массы этих фракций.

Для измерения глубины снега на заложенных профилях в апреле 2018 года были проведены снегомерные работы. На каждой пробной площади, при помощи лавинного щупа измерялась толщина снежного покрова не менее чем в 30-40 местах. Измерения проводились по двум направлениям (вдоль и поперек склонов) через равные расстояния. В последующем для исключения микрорельефных особенностей отложения снега вычислялись средние значения глубины снега. При невозможности измерения глубины снега при помощи лавинного щупа (недостаточная длина щупа) производилась покраска стволов деревьев на уровне снега и в летнее время определялась высота ствола от поверхности почвы до окрашенного участка (рис 3.8).



Рисунок 3.8 – Фиксирование высоты снежного покрова краской на стволе

Для измерения приземной температуры воздуха и температуры почвы на первом, втором и третьем уровнях высотных профилей была произведена установка термодатчиков (DS 1921 Thermochron iButton™). В целях минимизации попадания прямых солнечных лучей датчики температуры воздуха закреплялись на деревьях на высоте около 2 метров с северной стороны. Датчики температуры почвы закапывались на 10 см в почву. Общее количество установленных термодатчиков составило 52 шт.

Измерение и датировка годовых колец лиственницы, построение древесно-кольцевых хронологий нами проводились с использованием стандартных дендрохронологических приемов и методов (Шиятов и др., 2000). Таксационные показатели модельных деревьев и древостоев определялись общепринятыми в таксации леса и лесоводстве способами. Математико-статистическая обработка экспериментальных данных, оценка парных и множественных зависимостей между таксационными показателями деревьев выполнялись с использованием компьютерных программ «Excel 2016» и «Statistica 10.0». Для оценки корреляционных уравнений устанавливались достоверность их коэффициентов по критерию Стьюдента ( $t$ ), стандартная ошибка и коэффициент детерминации ( $R^2$ ). Анализ этих статистик позволял достаточно точно оценить адекватность уравнений экспериментальным материалам.

Некоторые методические вопросы целесообразно рассматривать по ходу изложения основного материала, поэтому они описываются в соответствующих главах диссертационной работы.

### **3.4 Объем выполненных работ по теме диссертации**

Диссертационная работа автора является частью комплексных исследований высокогорных лесных и лесотундровых сообществ. Объем выполненных работ по теме диссертации представлен в табл. 3.2.

При оценке надземной фитомассы древостоев и определении запасов депонированного углерода для анализа влажности и соотношений фракций взято более 320 образцов древесины и коры стволов, 38 образцов древесины и коры

Таблица 3.2 – Объем выполненных работ

| Переделы работ                                                                                                              | Высотные профили |           |           |           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|-----------|-----------|-----------|
|                                                                                                                             | западный         | северный  | восточный | южный     |
| Общая площадь пробных площадок (полигонов)                                                                                  | 0,60             | 0,40      | 0,48      | 0,60      |
| Количество индивидуально учтенных деревьев лиственницы (определений диаметра и высоты стволов и диаметра кроны), шт. (1186) | 354              | 183       | 291       | 358       |
| Количество определений возраста деревьев, шт.                                                                               | 251              | 109       | 96        | 220       |
| Количество срубленных модельных деревьев на исследование фитомассы, шт.                                                     | —                | —         | —         | 38        |
| Количество измерений глубины снежного покрова                                                                               | более 350        | более 200 | более 520 | более 420 |
| Количество пунктов измерений температуры воздуха                                                                            | 4                | 4         | 8         | 5         |
| Количество пунктов измерений температуры почвы                                                                              | —                | —         | —         | 31        |
| Обработано радиальных кернов древесины (1205)                                                                               | 297              | 199       | 394       | 315       |
| Измерена ширина годичных колец древесины (более 74000)                                                                      | 27081            | 7661      | 21555     | 18408     |
| Построена 41 древесно-кольцевая хронология                                                                                  | 11               | 5         | 13        | 11        |

ветвей и столько же навесок хвой.

В целом указанный экспериментальный материал при решении программных вопросов оказался вполне достаточным и репрезентативным.

### 3.5 Таксационная характеристика древостоев лиственницы

По материалам, полученным в результате подеревной таксации, для каждого высотного уровня исследуемых профилей устанавливались средние величины основных таксационных показателей деревьев и древостоев: возраста деревьев, их диаметра (у основания ствола и на высоте груди), высоты и диаметра кроны, а также проективного покрытия кроны и густоты древостоев (табл. 3.3).

Таблица 3.3 – Средние значения таксационных показателей лиственничников на исследуемых объектах

| Высотный уровень | Профиль | Высота над ур.м./м | Диаметр у основания, см | Диаметр на высоте 1,3 м | Высота, м | Возраст, годы | Диаметр кроны, м | Сомкнутость полога | Густота стволов, шт./га |
|------------------|---------|--------------------|-------------------------|-------------------------|-----------|---------------|------------------|--------------------|-------------------------|
| 1                | В       | 620                | 9,6±0,82                | 6,2±0,71                | 4,2±0,34  | 55±5,58       | 2,0±0,14         | 0,017              | 116                     |
| 2                | В       | 458                | 11,1±0,99               | 8,3±0,81                | 5,9±0,41  | 91±7,11       | 2,2±0,14         | 0,231              | 430                     |
| 3                | В       | 413                | 10,2±0,90               | 8,5±0,81                | 5,5±0,39  | 79±6,06       | 2,1±0,13         | 0,529              | 1123                    |
| 4                | В       | 358                | 20,0±1,33               | 14,6±0,97               | 8,6±0,49  | 133±7,42      | 2,8±0,16         | 0,338              | 783                     |
| 1                | Ю       | 604                | 7,6±0,58                | 3,6±0,41                | 2,7±0,15  | 41±4,77       | 1,8±0,12         | 0,032              | 175                     |
| 2                | Ю       | 586                | 9,4±0,58                | 6,3±0,50                | 4,5±0,21  | 44±2,78       | 2,3±0,13         | 0,267              | 983                     |
| 3                | Ю       | 563                | 16,0±1,30               | 12,4±1,11               | 6,7±0,42  | 103±7,01      | 3,2±0,24         | 0,393              | 725                     |
| 4                | Ю       | 515                | 16,8±1,44               | 15,0±1,26               | 7,8±0,52  | 106±7,66      | 2,7±0,19         | 0,288              | 583                     |
| 1                | З       | 650                | 8,1±0,69                | 3,8±0,37                | 3,7±0,27  | 59±5,20       | 1,5±0,10         | 0,105              | 625                     |
| 2                | З       | 579                | 13,0±1,67               | 9,0±1,31                | 6,8±0,83  | 116±14,50     | 3,0±0,37         | 0,212              | 363                     |
| 3                | З       | 500                | 17,4±0,84               | 12,0±0,63               | 7,7±0,37  | 153±4,84      | 3,2±0,15         | 0,566              | 1288                    |
| 4                | З       | 458                | 19,8±1,03               | 14,5±0,80               | 8,5±0,36  | 162±5,41      | 2,3±0,11         | 0,268              | 725                     |
| 1                | С       | 335                | -                       | -                       | -         | -             | -                | -                  | -                       |
| 2                | С       | 258                | 12,6±1,56               | 7,8±1,15                | 3,8±0,34  | 89±6,17       | 3,0±0,32         | 0,164              | 233                     |
| 3                | С       | 224                | 17,6±1,21               | 12,0±1,02               | 7,0±0,40  | 99±5,98       | 4,0±0,24         | 0,741              | 520                     |
| 4                | С       | 204                | 29,9±1,55               | 23,3±1,32               | 12,4±0,50 | 216±10,90     | 3,8±0,22         | 0,432              | 480                     |

Приступая к анализу материалов, представленных в таблице 3.3, необходимо отметить, что рассчитанные средние величины всех таксационных показателей достоверны на 5-ном уровне ( $t_{\text{факт.}} > t_{0,05}$ ) и соответствуют характеризующим ими совокупностям деревьев.

На всех профилях, за редким исключением, прослеживается заметное снижение средних значений возраста, диаметра и высоты деревьев по мере продвижения в гору.

Уменьшение среднего возраста лиственницы в указанном направлении (на восточном профиле со 133 до 55 лет, на южном – со 107 до 41, на западном – со 162 до 60 и на северном – с 216 до 89) является наглядным свидетельством того, что она на вышележащих уровнях появилась заметно позднее, чем на нижележащих. Этот факт косвенно указывает на неуклонное поднятие границы

леса, начиная с середины прошлого века. Известно, что примерно с этого периода отмечается глобальное повышение средней температуры воздуха.

С повышением высоты над уровнем моря на всех профилях наблюдается закономерное уменьшение средних значений диаметра и высоты деревьев. По среднему диаметру древостои четвертого высотного уровня превосходят древостои первого уровня на восточном склоне в 2,4, на южном 4,3 и западном 3,9 раза. Различия по средней высоте между древостоями первого и четвертого уровней несколько ниже, хотя также существенны. Значения этого показателя на четвертом уровне выше по сравнению с первым на восточном склоне в 2,1, на южном 2,9 и западном 2,4 раза. Такое положение, на наш взгляд, объясняется двумя причинами: снижением по мере повышения высоты над уровнем моря возраста деревьев и ухудшением почвенно-климатических условий.

С высотой над уровнем моря тесно связана площадь проективного покрытия крон, отражающаяся на величине сомкнутости полога древостоев. Как и следовало ожидать наибольшими значениями этого показателя характеризуются древостои на третьем и четвертом высотных уровнях исследуемых профилей, расположенные ниже ЭВГДР в сплошных насаждениях. Причем, на третьем уровне сомкнутость полога древостоев (от 0,39 до 0,741) заметно выше, чем на четвертом (от 0,27 до 0,43). Такое положение объясняется особенностями выборки. В целом, третий и четвертый уровни высотных профилей находятся на землях, занятых лесными насаждениями (Лесоустроительная инструкция..., 2022).

Сомкнутость полога на втором высотном уровне изменяется от 0,16 на северном профиле до 0,27 – на южном. Следовательно, в соответствии с данными исследователей высокогорий (Демьянов, 1977; Норин, 1979; Горчаковский, Шиятов, 1985; и др.) этот уровень на каждом профиле был зафиксирован в редколесье. На первом высотном уровне исследуемых профилей сомкнутость полога не превышает 0,1. Указанные выше авторы растительные сообщества с такой сомкнутостью полога считают рединами.

С сомкнутостью полога древостоев тесно связана их густота. Проявляется тенденция уменьшения густоты лиственничников с увеличением высоты над уровнем моря. На восточном, западном и северном профилях наибольшей густотой характеризуются древостои третьего высотного уровня, а на южном – второго. Все исследуемые древостои лиственницы имеют очень низкую производительность. Насаждение на нижнем уровне северного профиля характеризуется Va классом бонитета, а на всех остальных объектах – Vб.

Таким образом, на исследуемых склонах опытные объекты заложены на участках, занятых лесными насаждениями (третий и четвертый высотные уровни), на участках, занятых редколесьем (второй уровень) и на участках, занятых рединами (первый уровень).

## **Глава 4. Оценка условий местопроизрастания и радиального прироста лиственницы на высотных профилях**

### **4.1. Анализ изменения климата по данным метеостанций**

В последние несколько десятилетий, как отмечалось выше, мировое сообщество, проявляет особый интерес к проблеме потепления климата планеты. Объективную оценку изменения климатических условий в том или ином регионе можно произвести по данным многолетних наблюдений за погодными условиями, полученным на стационарных метеостанциях. Наиболее близко к району исследований расположены метеостанции «Дудинка» и «Игарка». Первая метеостанция находится в западном направлении на удалении 170 км от района исследований и располагает достаточно длинным рядом метеонаблюдений, начинающимся с 1906 года. Вторая метеостанция расположена на расстоянии 260 км в юго-западном направлении. По ней имеются метеоданные только с 1933 года.

Для оценки климатических условий района исследований была выбрана метеостанция «Дудинка», располагающаяся в 170 километрах на запад от объекта исследования. Замечательной особенностью метеостанции «Дудинка» по сравнению с другими, находящимися в относительной близости к району исследования, является более значимая длина ряда метеонаблюдений, который, как отмечалось выше, начинается с 1906 года.

На рис. 4.1. показано соотношение среднемесячных температур июня, полученных на метеостанциях «Дудинка» и «Игарка» за период с 1933 по 2012 гг. Анализ представленных на этом рисунке данных свидетельствует о высокой сопряженности июньских температур воздуха на указанных метеостанциях. Коэффициент детерминации связи среднемесячных температур июня по данным метеостанций «Дудинка» и «Игарка» составляет 0,927. Представленные материалы с определенной долей условности указывает на возможность и корректность оценки климатических показателей района исследований по данным лишь одной из этих метеостанций.

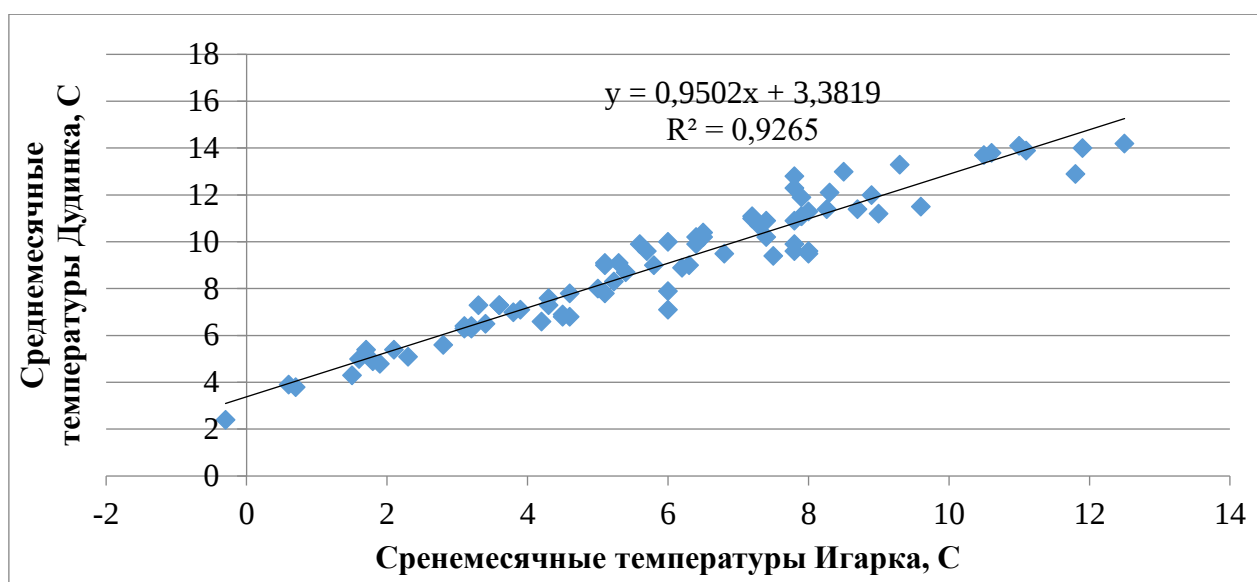


Рисунок 4.1 – Сопоставление среднемесячных температур июня метеостанций “Дудинка” и ”Игарка”

Район исследования характеризуется очень коротким летом. Положительные среднемесячные температуры наблюдаются с июня по сентябрь (рис. 4.2). Устойчивый переход к отрицательной температуре воздуха происходит в конце сентября – начале октября.

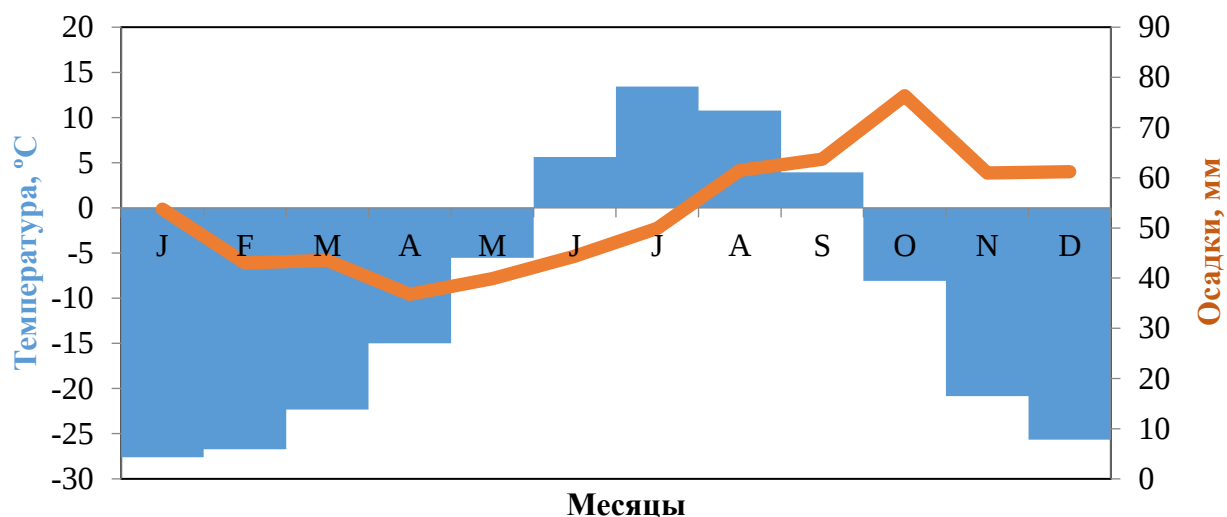


Рисунок 4.2 – Средние температуры воздуха и суммы осадков по данным метеостанции “Дудинка”

Для оценки изменений температурного режима в районе исследований расчетным путем были определены средние месячные, летние, зимние и годовые

вые температуры воздуха для двух календарных периодов: 1906-1940 и 1981-2017 гг. Результаты расчетов представлены в табл. 4.1.

Таблица 4.1 – Изменение температуры воздуха по данным метеостанции «Дудинка» за период с 1906 по 2017 гг., °С

| Месяцы                             | Периоды метеонаблюдений |           | Разница    |
|------------------------------------|-------------------------|-----------|------------|
|                                    | 1906-1940               | 1981-2017 |            |
| Январь                             | -27,7                   | -27,1     | 0,6        |
| Февраль                            | -24,8                   | -26,1     | -1,3       |
| Март                               | -22,8                   | -20,4     | <b>2,4</b> |
| Апрель                             | -15,4                   | -14       | 1,5        |
| Май                                | -6                      | -4,5      | 1,5        |
| Июнь                               | 4,7                     | 7,2       | <b>2,5</b> |
| Июль                               | 12,6                    | 14,1      | 1,5        |
| Август                             | 10,8                    | 11        | 0,2        |
| Сентябрь                           | 3,8                     | 4,1       | 0,4        |
| Октябрь                            | -8,4                    | -7,8      | 0,6        |
| Ноябрь                             | -20,2                   | -20,7     | -0,5       |
| Декабрь                            | -26,6                   | -24,3     | <b>2,4</b> |
| Летний период<br>(июнь-август)     | 9,3                     | 10,8      | 1,4        |
| Зимний период<br>(декабрь-февраль) | -26,4                   | -25,8     | 0,5        |
| Холодный период<br>(ноябрь-апрель) | -22,7                   | -21,6     | 1,1        |
| В среднем за год                   | -10                     | -9        | 1          |

Данные табл. 4.1. свидетельствуют, что отмечаемое в специальной литературе потепление климата в разных регионах и в масштабе планеты (Замолотчиков, 2015), наблюдается и в районе наших исследований. Среднегодовая температура воздуха по данным метеостанции «Дудинка» за анализируемый временной интервал повысилась на 1,0°С. Причем, повышение температуры воздуха в летний период (на 1,4°С) более значительно, чем в холодный (на 1,1°С) и зимний (на 0,5°С).

Обращает на себя внимание существенное увеличение температуры июня (на  $2,5^{\circ}\text{C}$ ), марта (на  $2,4^{\circ}\text{C}$ ) и декабря (на  $2,4^{\circ}\text{C}$ ), по сравнению с другими месяцами года. Температура воздуха в ноябре и феврале несколько понизились.

На рисунке 4.3 в качестве примера показано изменение средних температур июня за период с 1906 по 2017 гг. Анализируя его данные, можно отметить, что средние температуры существенно колеблются по календарным годам: от минусовых значений до  $12^{\circ}\text{C}$  и более. Тем не менее, отчетливо просматривается тенденция повышения данного показателя в течение анализируемого периода.

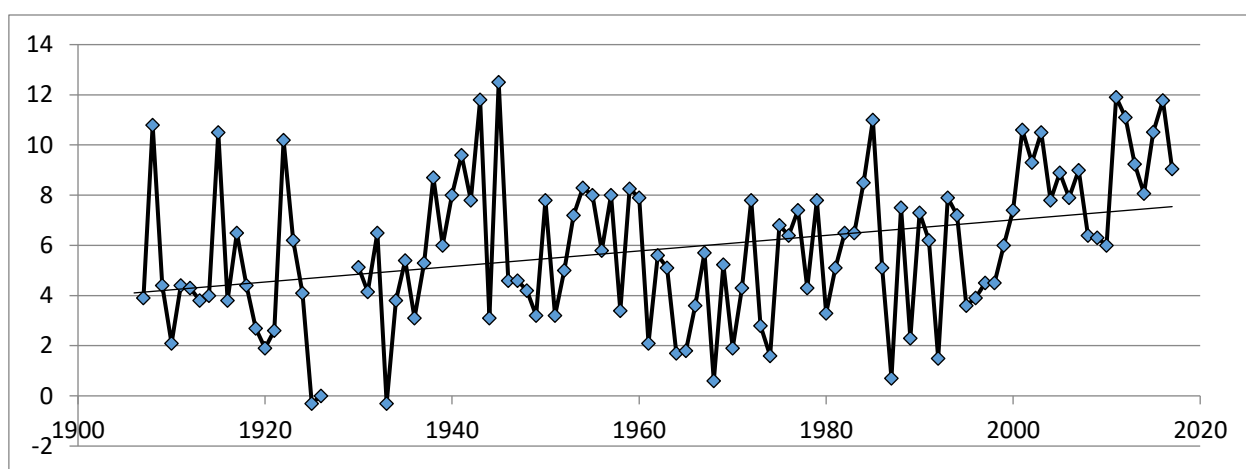


Рисунок 4.3 – Динамика средней температуры воздуха июня за период с 1906 по 2017 гг. по данным метеостанции «Дудинка»

Данные по атмосферным осадкам на метеостанции «Дудинка» нам удалось получить за период с 1942 по 2012 гг. Для оценки изменений в режиме атмосферных осадков в районе исследований были рассчитаны средние значения осадков по отдельным месяцам, а также в целом по летним и зимним месяцам для двух периодов: с 1942 по 1977 гг. и с 1978 по 2012 гг. Результаты соответствующих расчетов представлены в таблице 4.2.

При сравнении данных двух периодов наблюдений (1942-1977 и 1978-2012) обнаруживается, что в районе исследований выпадение осадков наиболее существенно повысилось в зимние месяцы: в декабре на 22 мм, в январе на 21 мм и в феврале на 22 мм. В целом за зимний период среднее количество осад-

Таблица 4.2. – Изменение количества атмосферных осадков по данным метеостанции Дудинка за период с 1942 по 2012 гг., мм

| Месяцы                            | Периоды метеонаблюдений |           | Разница    |
|-----------------------------------|-------------------------|-----------|------------|
|                                   | 1942-1977               | 1978-2012 |            |
| Январь                            | 43                      | 64        | <b>21</b>  |
| Февраль                           | 32                      | 54        | <b>22</b>  |
| Март                              | 39                      | 46        | 7          |
| Апрель                            | 36                      | 38        | 2          |
| Май                               | 40                      | 39        | -1         |
| Июнь                              | 44                      | 43        | -1         |
| Июль                              | 49                      | 51        | 1          |
| Август                            | 62                      | 62        | 1          |
| Сентябрь                          | 73                      | 54        | <b>-18</b> |
| Октябрь                           | 71                      | 79        | 8          |
| Ноябрь                            | 51                      | 70        | <b>19</b>  |
| Декабрь                           | 50                      | 72        | <b>22</b>  |
| Летний период (июнь – август)     | 155                     | 156       | 1          |
| Зимний период (декабрь – февраль) | 126                     | 190       | <b>64</b>  |
| В среднем за год                  | 590                     | 672       | <b>82</b>  |

ков увеличились на 64 мм (или 51%). В табл. 4.2 также обращает на себя внимание существенное увеличение количества осадков в ноябре (на 19 мм) и его уменьшение в сентябре (на 18 мм). В тоже время количество осадков в летний период осталось практически на том же уровне. В целом среднее годовое количество осадков за исследуемый период увеличилось на 82 мм (14%).

Наглядное представление о динамике средних летних и зимних атмосферных осадков за период с 1942 по 2012 гг. можно получить по данным рис. 4.4 и 4.5. Они, несмотря на существенные колебания осадков по календарным годам, подтверждают ранее сделанные выводы.

Полученные нами материалы о динамике атмосферных осадков хорошо согласуются с результатами других исследователей. О более существенном повышении количества зимних осадков по сравнению с летними в последние десятилетия отмечается в разных регионах страны (Шиятов и др., 2002; Бабенко, 2006; Бартыш, 2008; Моисеев, 2011; Григорьев, 2011).

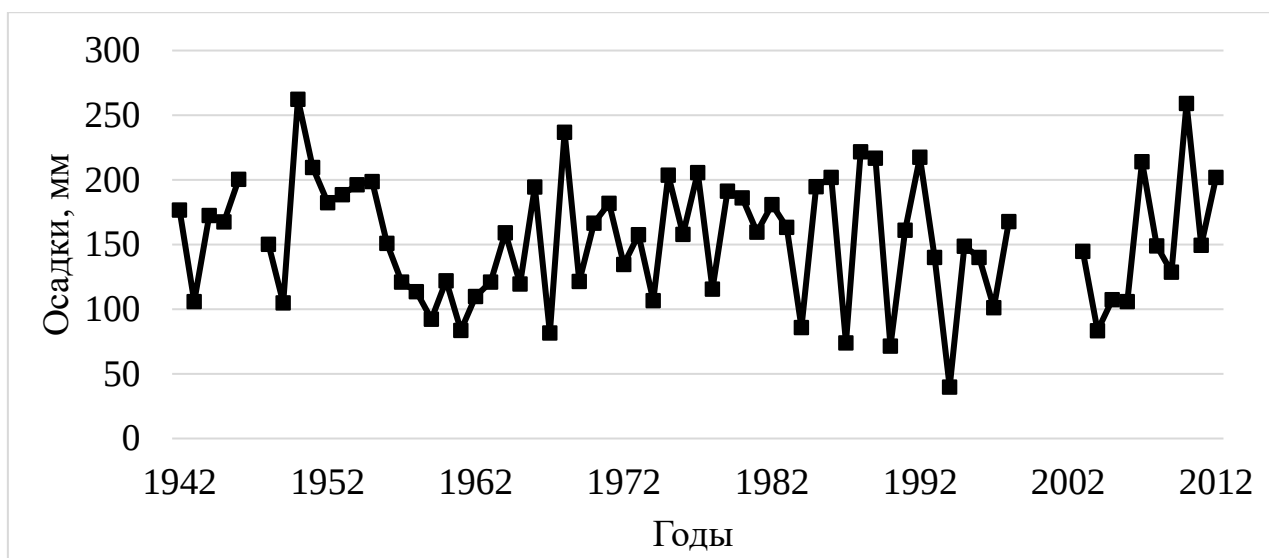


Рисунок 4.4 – Изменение количества атмосферных осадков летних месяцев (июнь-август) за период с 1942 по 2012 гг. по данным метеостанции “Дудинка”

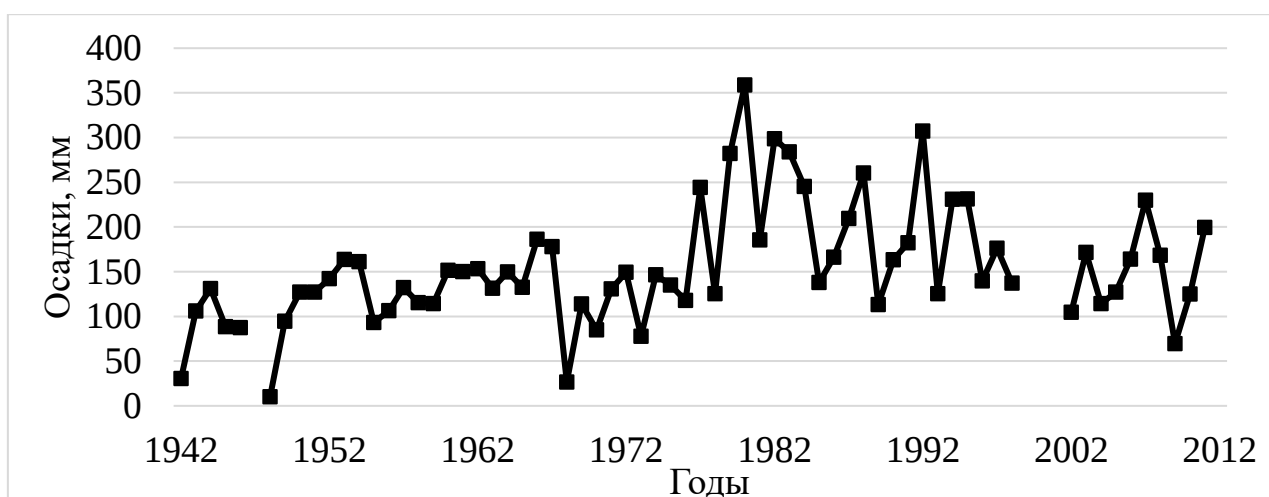


Рисунок 4.5 – Изменение количества атмосферных осадков зимних месяцев (декабрь - февраль) за период с 1942 по 2012 гг. по данным метеостанции “Дудинка”

В целом по результатам анализа климатических показателей, полученных на метеостанции «Дудинка», можно констатировать, что климат в исследуемом районе стал более теплым и влажным. Причем наиболее существенное повышение приземной температуры воздуха произошло счёт увеличения температуры июня, марта и декабря, а количество выпадающих осадков - за счет зимних месяцев.

#### 4.2. Оценка локальных условий местопроизрастания на заложенных высотных профилях

При оценке условий местопроизрастания лиственничников на заложенных профилях, а в пределах их – высотных уровнях учитывались следующие показатели: высота над уровнем моря, экспозиция склонов, их крутизна, температура воздуха и почвы, высота снежного покрова. Данные по первым трем показателям представлены в третьей главе диссертации. Среднемесячные температуры воздуха и почвы, полученные с помощью размещенных на исследуемых профилях термодатчиков, на примере южного склона представлены в табл. 4.3. Табличные материалы характеризуют изменение температуры воздуха (в кронах на высоте 2,0 м от поверхности почвы) и почвы (на глубине 10 см) по месяцам за период с 1 августа 2017 по 31 июля 2018 года.

Таблица 4.3 – Средняя температура воздуха и почвы в разных частях ЭВГДР, сомкнутом лесу и горной тундре на склоне южной экспозиции

| Год  | Месяц    | Температура воздуха, °С |                 |                    | Температура почвы, °С |        |                 |                    |
|------|----------|-------------------------|-----------------|--------------------|-----------------------|--------|-----------------|--------------------|
|      |          | ЭВГДР                   |                 | сомкну-<br>тый лес | горная<br>тундра      | ЭВГДР  |                 | сомкну-<br>тый лес |
|      |          | редины                  | редко-<br>лесье |                    |                       | редины | редко-<br>лесье |                    |
| 2017 | Август   | 8,7                     | 8,9             | 8,8                | 9,2                   | 9,0    | 9,6             | 9,2                |
| 2017 | Сентябрь | 1,5                     | 1,8             | 1,8                | 2,1                   | 2,1    | 3,3             | 2,9                |
| 2017 | Октябрь  | -6,6                    | -6,6            | -6,7               | -4,0                  | -2,8   | 0,2             | 0,1                |
| 2017 | Ноябрь   | -16,9                   | -16,9           | -17,1              | -14,7                 | -7,5   | -1,7            | -1,1               |
| 2017 | Декабрь  | -16,9                   | -16,8           | -16,9              | -14,9                 | -8,6   | -2,9            | -2,3               |
| 2018 | Январь   | -21,0                   | -21,4           | -21,4              | -21,5                 | -18,2  | -5,5            | -4,5               |
| 2018 | Февраль  | -20,0                   | -20,3           | -20,3              | -19,8                 | -16,7  | -6,2            | -5,3               |
| 2018 | Март     | -19,6                   | -19,3           | -19,6              | -20,3                 | -19,1  | -7,9            | -7,1               |
| 2018 | Апрель   | -10,2                   | -9,5            | -9,8               | -12,2                 | -13,2  | -6,9            | -6,0               |
| 2018 | Май      | -2,6                    | -2,0            | -2,4               | -0,9                  | -5,2   | -2,6            | -1,9               |
| 2018 | Июнь     | 15,9                    | 16,0            | 15,4               | 14,2                  | 13,2   | 9,5             | 6,9                |
| 2018 | Июль     | 9,6                     | 10,2            | 9,8                | 11,5                  | 10,8   | 10,4            | 8,6                |

Анализируя изменение температуры воздуха летних месяцев, можно отметить следующее. При продвижении вверх по склону и переходе от сомкнутого леса (от первого высотного уровня) к редколесью (ко второму уровню) она заметно увеличивается – по всем трем летним месяцам в среднем на 0,37 °С.

Данное обстоятельство можно объяснить резким снижением сомкнутости крон в редколесьях, что обеспечивает большее прогревание воздуха, а также разных частей деревьев. При дальнейшем продвижении вверх по склону и переходе от редколесья к редице (первому уровню) температура летних месяцев снижается, в среднем на  $0,30^{\circ}\text{C}$ . В этом случае незначительным снижением сомкнутости крон (на  $0,1-0,2$ ) не компенсируется общее уменьшение температуры воздуха, связанное с увеличением высоты над уровнем моря.

Аналогичные результаты выявляются при анализе изменений температуры воздуха весенних месяцев (с марта по май). При переходе от сомкнутого леса к редколесью средняя по трем весенним месяцам температура воздуха увеличивается на  $0,33^{\circ}\text{C}$ , а при переходе от редколесья к редице – она уменьшается на  $0,53^{\circ}\text{C}$ .

Заметных односторонних изменений температуры воздуха осенних (с сентября по ноябрь) и зимних (с декабря по февраль) месяцев в связи с высотой над уровнем моря по приведенным в табл. 4.3 материалам, не обнаруживается.

В целом, по представленным выше материалам можно сделать заключение, что наиболее благоприятный для роста растений температурный режим складывается в нижней части ЭВГДР, примыкающий к сомкнутым насаждениям. Здесь температуры воздуха весенних и летних месяцев, наиболее важные для формирования, роста и развития древесных растений, характеризуются более высокими значениями, чем даже в произрастающих ниже сомкнутых насаждениях.

По изменению температуры почвы в связи с высотой над уровнем моря месяцы календарного года можно условно распределить на три группы. Для месяцев первой группы (июня и июля) характерно закономерное увеличение температуры почвы по мере продвижения вверх по склону. Средние для этих двух летних месяцев температуры составляют: в сомкнутом лесу  $7,8^{\circ}\text{C}$ , в редколесье –  $10,0^{\circ}\text{C}$ , в редице –  $12,0^{\circ}\text{C}$  и в горной тундре –  $12,9^{\circ}\text{C}$ . Такая динамика температуры почвы в этот период связана со степенью затенения почвы кронами де-

ревьев и ольховника. Она закономерно уменьшается по мере продвижения вверх по склону.

Месяцы второй группы холодного периода года (октябрь, ноябрь, декабрь, январь, февраль, март и апрель), характеризуются закономерным уменьшением температуры почвы с увеличением высоты над уровнем моря. В данном случае закономерное снижение температуры почвы по мере продвижения вверх по склону объясняется существенным уменьшением в этом направлении высоты снежного покрова. Чем выше высота снега, тем в меньшей степени промерзает почва.

Месяцы третьей группы (май, август и сентябрь) выделяются отсутствием одностороннего, устойчивого изменения температуры почвы с повышением или понижением высоты над уровнем моря.

На рис. 4.6. представлены данные о средней температуре воздуха в июне 2019 года на разных профилях, снятые с термодатчиков.

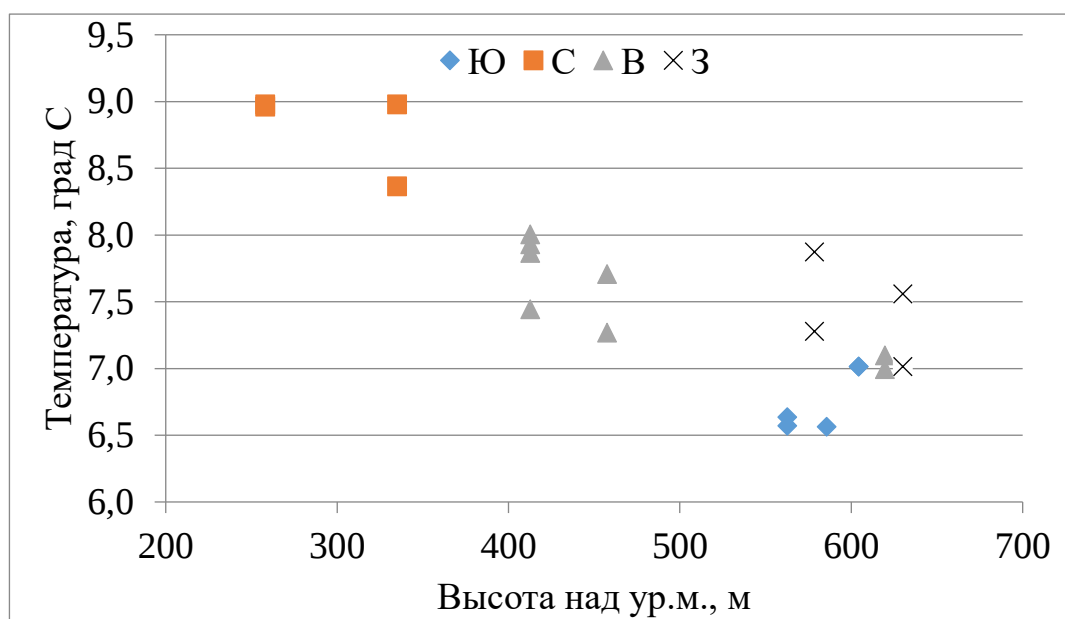


Рисунок 4.6 – Средняя температура воздуха в июне 2019 г.  
на различных высотных уровнях исследуемых профилей

На основе их анализа можно сделать заключение, что наиболее высокими июньскими температурами отличаются участки на северном профиле. Значения этого показателя на разных высотных уровнях данного профиля изменяются от

8,4 до 9,0°C. Наименьшими июньскими температурами (от 6,6 до 7,1°C) характеризуются высотные уровни южного профиля. Восточный и западный профили по величине температуры июня занимают промежуточное положение. Причем, высотные уровни восточного профиля отличаются несколько большими значениями температуры (от 7,3 до 8,0°C), чем западного (от 7,0 до 7,8°C). Близкие результаты получаются и при сравнении профилей по температурам воздуха других месяцев. Таким образом, по уменьшению температуры воздуха в ЭВГДР исследуемые профили располагаются в следующий ряд: северный-восточный-западный-южный. Такое положение объясняется различиями высотных уровней (и в целом ЭВГДР) исследуемых профилей по абсолютным высотам относительно уровня моря. Как отмечалось выше, ЭВГДР наиболее высокое положение занимает на южном и западном склонах, а самое низкое – на северном. Восточный склон в этом отношении занимает промежуточное положение между северным и западным склонами. Снижение температуры воздуха в горах с увеличением высоты над уровнем моря является известным фактом.

В высокогорьях важнейшим условием для выживания и роста растений является высота снежного покрова, от которого зависит степень промерзания почвы в зимнее время. В табл. 4.4 представлены данные о мощности снега на высотных уровнях исследуемых профилей. Они были получены в результате снегомерных работ в апреле 2019 г. до начала таяния снега.

Данные, представленные в табл. 4.4, свидетельствуют о высокой изменчивости высоты снега по исследуемым профилям, а в их пределах – высотным уровням. По средней мощности снежного покрова самый многоснежный участок (второй высотный уровень южного профиля) имеет превосходство над самым малоснежным (первый уровень южного профиля) в 8,3 раза. На восточном профиле наибольшая толщина снежного покрова зафиксирована на 4 высотном уровне (в среднем 132 см), на западном – на третьем (131 см), на южном и северном профилях – на втором (166 и 161 см, соответственно). В целом, более многоснежным является северный склон, на котором средняя высота снега по высотным уровням изменяется от 88 до 161 см. Самыми низкими средними зна

Таблица 4.4 – Высота снежного покрова на высотных уровнях исследуемых профилей

| Высотные уровни | Значения     | Высотные профили |              |              |              |
|-----------------|--------------|------------------|--------------|--------------|--------------|
|                 |              | восточный        | южный        | западный     | северный     |
| 1               | Минимальное  | 0                | 0            | 5            | 55           |
|                 | Максимальное | 145              | 85           | 195          | 140          |
|                 | Среднее      | <b>34±2</b>      | <b>20±1</b>  | <b>70±3</b>  | <b>88±2</b>  |
| 2               | Минимальное  | 0                | 50           | 25           | 105          |
|                 | Максимальное | 190              | 255          | 207          | 215          |
|                 | Среднее      | <b>75±2</b>      | <b>166±3</b> | <b>128±4</b> | <b>161±2</b> |
| 3               | Минимальное  | 0                | 50           | 76           | 105          |
|                 | Максимальное | 246              | 190          | 191          | 230          |
|                 | Среднее      | <b>76±4</b>      | <b>106±2</b> | <b>131±2</b> | <b>140±3</b> |
| 4               | Минимальное  | 55               | 90           | 80           | 105          |
|                 | Максимальное | 205              | 170          | 195          | 190          |
|                 | Среднее      | <b>132±3</b>     | <b>124±2</b> | <b>130±4</b> | <b>134±3</b> |

чениями мощности снега характеризуется восточный профиль (от 34 до 132 см). Южный и западный склоны по этому показателю занимают промежуточное положение.

На восточном и западном склонах наблюдается достаточно устойчивое снижение толщины снега по мере повышения высоты над уровнем моря. На двух остальных склонах такой закономерности не наблюдается.

В высокогорьях на режим снегонакопления оказывают влияние множество факторов: густота и сомкнутость древостоев, особенности мезорельефа, воздействие ветров и ветрообдуваемость участков и др. (Горчаковский, Шиятов, 1971; Григорьев, 2011). Указанные факторы и обуславливают высокую изменчивость высоты снежного покрова на исследуемых профилях.

В специальной литературе отмечается, что в условиях высокогорий, чем больше высота снежного покрова, тем позднее на этом участке снег стаивает. Чем больше ориентация участка к южной экспозиции, тем раньше на нем происходит таяние снега, а это сказывается на длительности периода вегетации (Горчаковский, Шиятов, 1985). На хорошо прогреваемых южных склонах весенние явления совершаются более быстро и более бурно, чем на северных и

северо-восточных, где этот период несколько растянут во времени (Горчаковский, Булатова, 1979).

#### **4.3. Радиальный прирост лиственницы на исследуемых объектах**

Древесно-кустарниковая растительность в ЭВГДР, как отмечалось выше, наиболее выраженно реагирует на изменение условий среды и поэтому чаще всего используется для оценки и индикации этих изменений. При проведении такой оценки наиболее удобным индикаторным показателем деревьев, безусловно, является их прирост по диаметру (радиусу). Это объясняется следующим. При оценке влияния тех или иных факторов на рост деревьев за определенные периоды, приросты по любому таксационному показателю (диаметру, высоте, объему и др.) являются более информативными и объективными, чем их абсолютные (интегральные) значения. В тоже время прирост по радиусу является более технологичной (легко и точно определяемой) величиной, чем приросты по другим размерным показателям. В этой связи, многие исследователи акцентируют внимание на изучение связей между радиальным приростом и климатическими параметрами, результаты которого, в частности, позволяют реконструировать изменение климата за разные промежутки времени, а также оценить пространственно-временную динамику древесной растительности (Горчаковский, Шиятов, 1985; Моисеев, 2002; и др.). При реконструкции изменений климата и оценке влияния этих изменений на растительность наиболее значимые результаты следует ожидать при проведении исследований в высокоширотных районах, в которых происходят наиболее существенные изменения климатических условий (Шиятов, 2009; Chapin et al., 2005; Pauli et al., 2012; Rantanen, 2022), а в пределах их - в высокогорных лесотундровых сообществах. В этом отношении высокогорья плато Путорана, в которых проводились наши работы, являются очень перспективными объектами.

Ширина годичного кольца (ШГК) обусловлена влиянием различных факторов, которых можно разделить на внешние и внутренние. К внешним факторам относятся климатические и эдафические условия, стихийные явления (по-

жары, буреломы, развитие энтомовредителей и др.), деятельность человека, а к внутренним - биологические особенности древесных пород, возраст, происхождение, генетические особенности растений.

Формирование величины годичного кольца передается линейно-агрегированной моделью:

$$R_t = A_t + C_t + D1_t + D2_t + E_t,$$

где  $R$  – величина годичного прироста;

$t$  – номер года;

$A$  – отклонение роста, связанное с возрастом растения;

$C$  – климатические условия в течение периода роста;

$D1$  – случаи нарушения структуры внутри лесного массива;

например, ветровал;

$D2$  – влияние внешних факторов на лесной массив, например;

вспышка численности насекомых-вредителей;

$E$  – случайные процессы или ошибки.

При проведении дендроклиматических исследований особый интерес представляет выделение климатически обусловленной составляющей  $C_t$ .

Измерение и датировка годичных колец лиственницы нами проводились с использованием стандартных дендрохронологических методов (Шиятов и др., 2000). Статистический анализ качества датировки выполнялся с применением программы COFECHA (Cook, Peters, 1981; Holmes, 1992). Вычисление индексов радиальных приростов и построение обобщенной древесно-кольцевой хронологии осуществлялись средствами программы ARSTAN (Cook, 1985). Для уточнения возраста растений определялась и вносилась поправка на высоту бурения (Моисеев и др., 2010). Корреляционный анализ выполнялся средствами программы Dendroclim 2002 (Biondi, 2004). Методом скользящей корреляции (30-летней скользящий средней) была проведена оценка связей между температурой воздуха и индексами прироста для определения климатически обусловленной составляющей ШГК.

Известно, что возраст деревьев оказывает существенное влияние как на их биометрические показатели, так и на ШГК (Шиятов, Мазепа, 1986; Ваганов и др., 1996; Тишин, 2006; Jiao, Jiang, 2017). В этой связи, в наших исследованиях для получения более обоснованных и надежных результатов на основе данных о возрасте каждого растущего дерева все они были объединены в 4 возрастные группы: I – 1–40 лет; II – 41–80 лет; III – 81–120 лет; IV – 121 год и более. Затем для каждого календарного года определялись средние значения ШГК по всем деревьям в соответствующей возрастной группе. В результате этой процедуры были построены хронологии осреднённых радиальных приростов (ОРП) для каждой возрастной группы деревьев по всем исследуемым профилям, а в их пределах – высотном уровням. Для оценки величины и изменчивости радиального прироста для полученных осреднённых хронологий были вычислены значения средней, максимальной и минимальной ШГК и коэффициенты вариации.

Для каждой возрастной группы на исследуемых объектах также были вычислены средние индексированные значения ШГК и построены хронологии индексов прироста. Причем, в дальнейший анализ были включены только те хронологии, при составлении которых использовались не менее 10 образцов. Для хронологий индексов прироста вычислялись средний коэффициент чувствительности и коэффициент межсерийной корреляции.

При выполнении данных исследований, как указывалось выше, в общей сложности было измерено более 73000 годичных колец у 1073 радиальных кернов древесины. Для повышения сопоставимости результатов и удобства анализа длина хронологий ограничивалась следующими цифрами: в I возрастной группе 21 годом, во II группе 37, в III группе 64 и в IV группе 110 годами.

В результате проведённых исследований установлено, что изменения древесно-кольцевых хронологий (ДКХ) осреднённых радиальных приростов на всех профилях имеют общие закономерности (рис. 4.7). Так, молодые деревья

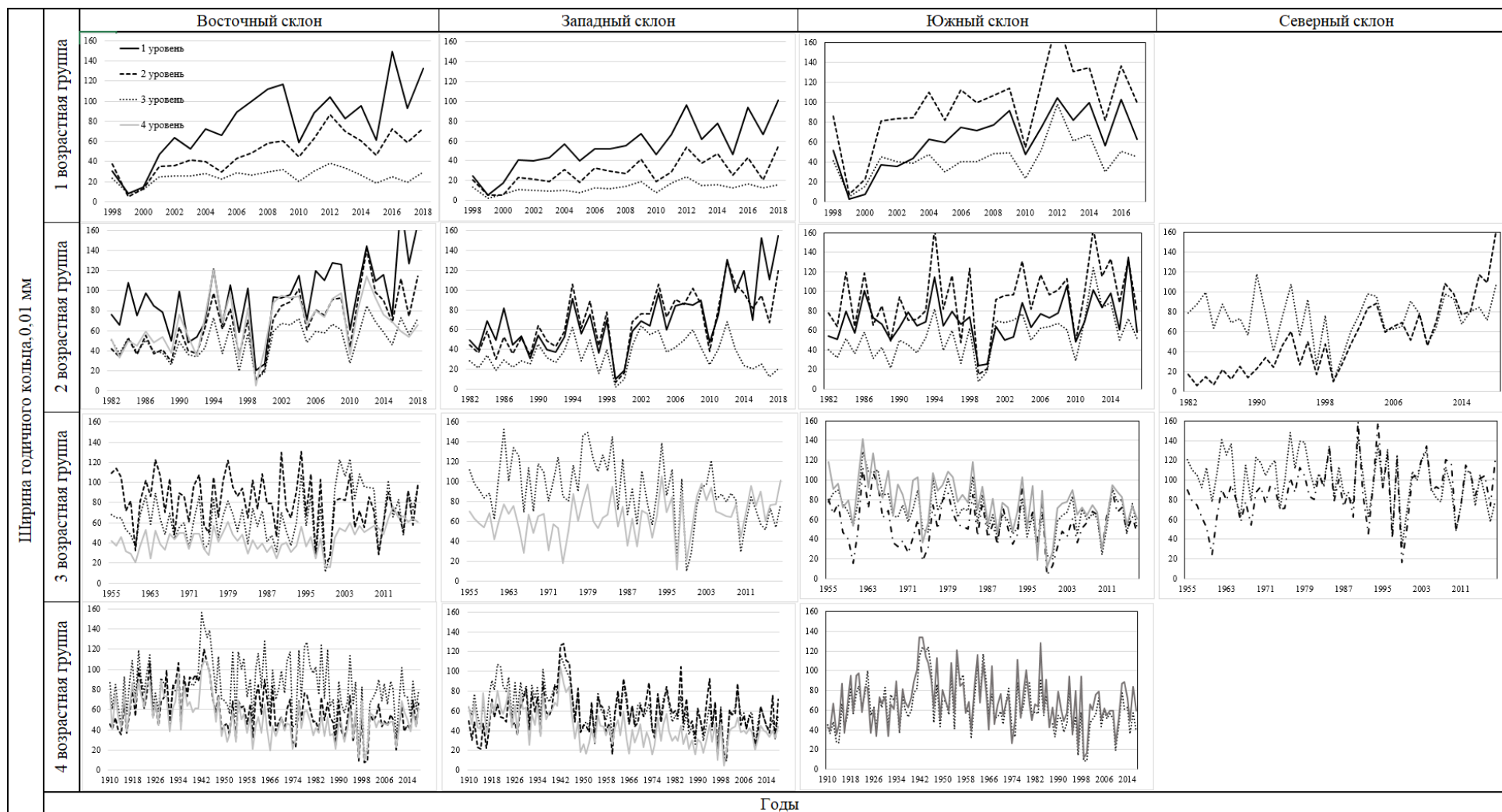


Рисунок 4.7 – Абсолютные обобщенные хронологии в разных возрастных группах деревьев на исследуемых объектах

(в первой и второй возрастных группах) характеризуются ярко выраженными трендами на увеличение осредненных приростов. В тоже время ШГК старшевозрастных деревьев в III и IV группах, наоборот, отличается тенденцией к уменьшению. Данное обстоятельство, на наш взгляд, обусловлено закономерным снижением радиальных приростов в соответствии с биологическими особенностями роста деревьев. Известно, что возрастная динамика таксационных показателей выражается S-образной кривой, представленной двумя ветвями - возрастающей (вогнутая часть кривой) и затухающей (выпуклая). Соотношение этих ветвей зависит от множества внутренних и внешних факторов и потому может быть весьма разнообразным (Кузьмичев, 1977). Это означает, что приросты деревьев по размерным показателям достигнув максимума в определенном возрасте с дальнейшим увеличением возраста закономерно снижаются. Результаты статистической оценки построенных хронологий представлены в табл. 4.5. Анализ ее данных позволяет отметить следующее. Средняя ШГК по всем построенным хронологиям изменяется от 0,125 до 1,003 мм. У деревьев, принадлежащих к одной возрастной группе, этот показатель в целом уменьшается со снижением высоты над уровнем моря и увеличением густоты древостоев. Наиболее отчетливо это уменьшение проявляется в первой и во второй возрастных группах.

Таблица 4.5 – Статистические характеристики древесно-кольцевых хронологий

| Возрастная группа | Высотный уровень | Осреднённые значения ШГК  |                                      |                               |                                |                         | Индексированные значения ШГК         |                                            |
|-------------------|------------------|---------------------------|--------------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|-------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------------|
|                   |                  | средняя ШГК, $10^{-2}$ мм | стандартное отклонение, $10^{-2}$ мм | минимальная ШГК, $10^{-2}$ мм | максимальная ШГК, $10^{-2}$ мм | коэффициент вариации, % | средний коэффициент чувствительности | средний коэффициент межсерийной корреляции |
| 1                 | 2                | 3                         | 4                                    | 5                             | 6                              | 7                       | 8                                    | 9                                          |
| Восточный профиль |                  |                           |                                      |                               |                                |                         |                                      |                                            |
| I                 | 1                | 78                        | 36,3                                 | 8,5                           | 148,7                          | 46,5                    | 0,51                                 | 0,43                                       |
|                   | 2                | 48,7                      | 20                                   | 5                             | 86,7                           | 41                      | 0,5                                  | 0,41                                       |
|                   | 3                | 25,3                      | 6,9                                  | 8                             | 38,4                           | 27,3                    | 0,58                                 | 0,43                                       |

Продолжение табл. 4.5

| 1                | 2 | 3    | 4    | 5    | 6     | 7    | 8    | 9    |
|------------------|---|------|------|------|-------|------|------|------|
| II               | 1 | 93,2 | 35,5 | 20,5 | 187,1 | 38,1 | 0,53 | 0,59 |
|                  | 2 | 67,2 | 29,5 | 10,5 | 141,1 | 43,9 | 0,52 | 0,58 |
|                  | 3 | 50,6 | 17,5 | 10,8 | 84,9  | 34,5 | 0,57 | 0,51 |
|                  | 4 | 67,3 | 25,6 | 4,9  | 120,7 | 38   | 0,55 | 0,61 |
| III              | 1 | —    | —    | —    | —     | —    | —    | —    |
|                  | 2 | 80,8 | 26   | 20,2 | 130,7 | 32,2 | 0,47 | 0,69 |
|                  | 3 | 66,6 | 24,8 | 10,9 | 123,5 | 37,3 | 0,52 | 0,47 |
|                  | 4 | 44,4 | 13   | 16,1 | 76,1  | 29,2 | 0,51 | 0,37 |
| IV               | 1 | —    | —    | —    | —     | —    | —    | —    |
|                  | 2 | 59,1 | 22,6 | 8    | 119,6 | 38,3 | 0,53 | 0,72 |
|                  | 3 | 82,8 | 26,9 | 9    | 156,6 | 32,5 | 0,49 | 0,51 |
|                  | 4 | 53,1 | 20,1 | 10,2 | 108,1 | 37,9 | 0,56 | 0,59 |
| Западный профиль |   |      |      |      |       |      |      |      |
| I                | 1 | 54,8 | 24,5 | 5,6  | 100,8 | 44,7 | 0,53 | 0,54 |
|                  | 2 | 28,8 | 13,6 | 5    | 54,8  | 47,4 | 0,64 | 0,43 |
|                  | 3 | 12,5 | 4,8  | 1,9  | 23,7  | 38,7 | 0,59 | 0,44 |
| II               | 1 | 70,6 | 33,4 | 9,7  | 155,2 | 47,3 | 0,53 | 0,67 |
|                  | 2 | 68,6 | 29,1 | 6,4  | 129,5 | 42,4 | 0,54 | 0,65 |
|                  | 3 | 34,9 | 16,2 | 1,6  | 67,8  | 46,4 | 0,64 | 0,49 |
|                  | 4 | —    | —    | —    | —     | —    | —    | —    |
| III              | 1 | —    | —    | —    | —     | —    | —    | —    |
|                  | 2 | —    | —    | —    | —     | —    | —    | —    |
|                  | 3 | 91,1 | 30,7 | 10,4 | 152,1 | 33,7 | 0,47 | 0,65 |
|                  | 4 | 65,2 | 20,3 | 11,9 | 104,9 | 31,1 | 0,56 | 0,51 |
|                  | 2 | 57,8 | 22,5 | 9,8  | 128   | 39   | 0,51 | 0,71 |
| IV               | 3 | 61,9 | 20,7 | 9,4  | 116,9 | 33,4 | 0,49 | 0,68 |
|                  | 4 | 44   | 18,4 | 4,4  | 103,6 | 41,8 | 0,55 | 0,62 |
| Южный профиль    |   |      |      |      |       |      |      |      |
| I                | 1 | 62,4 | 30,6 | 3,4  | 104   | 49,1 | 0,5  | 0,69 |
|                  | 2 | 96,5 | 43,6 | 7,8  | 183,2 | 45,2 | 0,54 | 0,68 |
|                  | 3 | 43,6 | 21,1 | 5,6  | 98    | 48,3 | 0,55 | 0,66 |
| II               | 1 | 71,2 | 25,2 | 23,8 | 134,8 | 35,4 | 0,51 | 0,44 |
|                  | 2 | 92,1 | 36,9 | 15,4 | 164,3 | 40   | 0,53 | 0,75 |
|                  | 3 | 54,3 | 24,3 | 7,3  | 124,7 | 44,7 | 0,55 | 0,54 |
|                  | 4 | —    | —    | —    | —     | —    | —    | —    |

Окончание табл. 4.5

| 1                | 2 | 3     | 4    | 5    | 6     | 7    | 8    | 9    |
|------------------|---|-------|------|------|-------|------|------|------|
| III              | 1 | —     | —    | —    | —     | —    | —    | —    |
|                  | 2 | 55,9  | 23,4 | 3,7  | 112,4 | 42   | 0,59 | 0,64 |
|                  | 3 | 68,8  | 23,4 | 19,7 | 128,4 | 34,1 | 0,52 | 0,49 |
|                  | 4 | 78,2  | 26,8 | 11,6 | 141,7 | 34,3 | 0,57 | 0,59 |
| IV               | 1 | —     | —    | —    | —     | —    | —    | —    |
|                  | 2 | —     | —    | —    | —     | —    | —    | —    |
|                  | 3 | 62,6  | 24,7 | 8,5  | 124,2 | 39,4 | 0,55 | 0,59 |
|                  | 4 | 69,3  | 26,2 | 12,1 | 134,1 | 37,8 | 0,62 | 0,55 |
| Северный профиль |   |       |      |      |       |      |      |      |
| I                | 1 | —     | —    | —    | —     | —    | —    | —    |
|                  | 2 | 27,1  | 10,8 | 4    | 52,4  | 39,8 | 0,57 | 0,36 |
|                  | 3 | —     | —    | —    | —     | —    | —    | —    |
| II               | 1 | —     | —    | —    | —     | —    | —    | —    |
|                  | 2 | 53,1  | 36,2 | 6    | 159,9 | 68,3 | 0,66 | 0,47 |
|                  | 3 | 73,9  | 23   | 10,4 | 117,7 | 31,1 | 0,54 | 0,54 |
|                  | 4 | —     | —    | —    | —     | —    | —    | —    |
| III              | 1 | —     | —    | —    | —     | —    | —    | —    |
|                  | 2 | 88,5  | 27,6 | 16,2 | 159,3 | 31,2 | 0,46 | 0,61 |
|                  | 3 | 100,3 | 26,1 | 31,8 | 148,2 | 26   | 0,42 | 0,62 |
|                  | 4 | —     | —    | —    | —     | —    | —    | —    |
| IV               | 1 | —     | —    | —    | —     | —    | —    | —    |
|                  | 2 | —     | —    | —    | —     | —    | —    | —    |
|                  | 3 | —     | —    | —    | —     | —    | —    | —    |
|                  | 4 | —     | —    | —    | —     | —    | —    | —    |

Для оценки влияния высоты над уровнем моря на ШГК в большей степени подходят древостои на восточном и западном склонах, характеризующихся наибольшим количеством построенных хронологий прироста. На этих склонах для каждой возрастной группы деревьев хронологии удалость построить практически по всем высотным уровням. Установлено, что на восточном склоне при переходе от первого уровня (редины) к третьему (верхняя граница сомкнутого леса) средняя ШГК уменьшается у деревьев первой возрастной группы в 3,1 раза, а у второй груп-

пы - 1,8 раза. На западном склоне это уменьшение выражено еще в большей степени: в первой возрастной группе в 4,4 раза, во второй - в 2,0 раза.

Устойчивые, односторонние изменения средней ШГК в связи с высотой над уровнем моря, у деревьев старших возрастных групп, а также на южном и северном склонах, по представленным в табл. 4.5 материалам, не обнаруживаются. В данном случае это связано, на наш взгляд, не с отсутствием соответствующих закономерностей, а с не достаточным количеством построенных хронологий для полноценного анализа. По имеющимся хронологиям на южном склоне у деревьев первого и второго возрастных групп максимальные значения ШГК наблюдаются на втором высотном уровне, а третьей и четвертой групп - на четвертом. Для северного профиля, в виду малого количества построенных хронологий, получение подобных сведений не представлялось возможным.

При анализе средней ШГК у деревьев, произрастающих на одних и тех же высотных уровнях различных профилей, обнаруживается влияние экспозиции склона на величину этого показателя. Наиболее корректно такой анализ можно выполнить по хронологиям, построенным для первой и второй возрастных групп деревьев на вторых высотных уровнях исследуемых профилей. Это связано с полнотой материала для анализа: вторые высотные уровни всех четырех профилей представлены хронологиями приростов деревьев первой и второй возрастных групп. На основе соответствующего анализа по уменьшению средней ШГК как у деревьев первой, так и у деревьев второй возрастных групп, склоны можно расположить в следующий ряд: южный - восточный - западный - северный. Таким образом, лучшими условиями для формирования годичного прироста по радиусу характеризуется южный склон, а худшими - северный.

О влиянии экспозиции склона на рост деревьев отмечается и работах других исследователей. В частности, существенные различия в динамике радиально прироста деревьев лиственницы на склонах северной и южной экспозиций выявлены в лесах Эвенкии (Бенькова и др., 2015). Установлено, что поступление солнечной радиа-

ции на северном склоне на 20% меньше, чем на южном. В результате этого деревья на северном склоне характеризуются более низкими значениями биометрических характеристик и ШГК. Аналогичные данные получены в горах Юкона (Dearborn et al., 2017). Отмечается, что на южных склонах почвы отличаются более высокими температурами, чем на северных.

Коэффициент вариации ШГК по всем построенным хронологиям приростов изменяется в диапазоне от 26 до 68,3%. При прочих равных условиях наиболее высокими значениями этого показателя характеризуются первый и второй возрастные группы деревьев и первый и второй высотные уровни исследуемых профилей.

Одним из основных параметров, характеризующих качество хронологий является чувствительность. Коэффициент чувствительности показывает влияние внешних условий на ШГК. Чем неблагоприятнее условия роста, тем более чувствительными будут хронологии (Frits, 1976). На исследуемых объектах средний коэффициент чувствительности для индексированных значений ШГК изменяется в пределах от 0,42 до 0,66. Все полученные хронологии являются чувствительными, что позволяет использовать их для дендроклиматического анализа. Этот показатель во всех возрастных группах деревьев на исследуемых профилях имеет тенденцию к увеличению по мере снижения высоты над уровнем моря. При прочих равных условиях в старших возрастных группах деревьев он выше, чем в младших.

Средний коэффициент корреляции показывает синхронность ШГК с воздействием внешнего фактора, общего для всех деревьев в пределах исследуемых объектов. Значения среднего коэффициента межсерияльной корреляции по всем построенным хронологиям приростов изменяются в диапазоне от 0,36 до 0,72. Все полученные хронологии достаточно сильно друг с другом коррелируют, что говорит об наличии общего сигнала. Наблюдается тенденция повышения этого показателя с увеличением возраста деревьев. Однако на южном профиле она не обнаруживается. При прочих равных условиях коэффициент межсерияльной корреляции хронологий

приростов у деревьев одного возраста имеет тенденцию к понижению с уменьшением высотной позиции древостоев.

По результатам проведённого анализа хронологий приростов значительный интерес возникает к оценке морфометрических показателей деревьев I и II возрастных групп. Результаты такой оценки представлены в табл. 4.6. Они свидетельствуют, что изменения средних таксационных показателей деревьев лиственницы, связанные с изменением высоты над уровнем моря, на восточном и западном склонах имеют общую направленность: при одинаковом среднем возрасте диаметр стволов у основания, их высота и диаметр кроны деревьев и первой и второй возрастных групп, закономерно уменьшаются с понижением высотной позиции древостоев. Так, на восточном склоне при переходе от первого высотного уровня к третьему у деревьев первой возрастной группы диаметр стволов уменьшается в 2,9 раза, высота стволов - в 2,2 и диаметр кроны - в 2,8 раза. На западном склоне это уменьшение выражено ещё в большей степени: диаметр стволов снижается в 4,5 раза, высота - в 3,2, диаметр кроны - в 3 раза.

Уменьшение средних морфометрических показателей деревьев второй возрастной группы со снижением высоты над уровнем моря выражено в значительно меньшей степени. На восточном склоне при передвижении от первого высотного уровня к третьему диаметр стволов снижается в 1,6 раза, высота стволов - 1,2 раза, диаметр кроны - в 1,4 раза. На западном склоне уменьшение таксационных показателей в этом направлении передается следующими цифрами: диаметр стволов снижается в 1,3 раза, их высота - в 1,7, а диаметр кроны - в 1,3 раза.

На южном склоне максимальные значения морфометрических показателей деревьев в 1 и 2 возрастных группах наблюдаются на 2 высотном уровне. Такой же результат был приведен выше по средней ШГК. На наш взгляд, это объясняется тем, что пробные площади на первом высотном уровне южного профиля находятся на ветрообдуваемом участке с минимальной высотой снежного покрова (табл. 4.4). Это, без-

Таблица 4.6 – Морфометрические показатели деревьев I и II возрастных групп

| Возрастная группа | Высотный уровень | Диаметр ствола у основания, см | Высота ствола, м | Диаметр кроны, м | Средний возраст, лет |
|-------------------|------------------|--------------------------------|------------------|------------------|----------------------|
| Восточный склон   |                  |                                |                  |                  |                      |
| I                 | 1                | 4,3±0,7                        | 2,0±0,4          | 1,1±0,2          | 28±1,5               |
|                   | 2                | 2,2±0,4                        | 1,4±0,3          | 0,7±0,1          | 28±2,2               |
|                   | 3                | 1,5±0,2                        | 0,9±0,1          | 0,4±0,1          | 27±0,7               |
| II                | 1                | 8,5±0,7                        | 3,8±0,4          | 1,8±0,2          | 53±2,0               |
|                   | 2                | 6,6±0,8                        | 3,9±0,5          | 1,8±0,2          | 55±2,0               |
|                   | 3                | 5,3±0,6                        | 3,1±0,3          | 1,3±0,1          | 58±1,2               |
| Западный склон    |                  |                                |                  |                  |                      |
| I                 | 1                | 3,6±0,5                        | 1,6±0,2          | 0,9±0,1          | 26±1,2               |
|                   | 2                | 1,8±0,3                        | 0,9±0,1          | 0,4±0,1          | 23±1,3               |
|                   | 3                | 0,8±0,2                        | 0,5±0,1          | 0,3±0,1          | 22±1,9               |
| II                | 1                | 7,3±0,7                        | 3,6±0,3          | 1,5±0,1          | 54±1,8               |
|                   | 2                | 5,5±0,7                        | 2,2±0,4          | 1,5±0,2          | 55±2,0               |
|                   | 3                | 5,7±1,6                        | 2,1±0,3          | 1,2±0,2          | 61±3,3               |
| Южный склон       |                  |                                |                  |                  |                      |
| I                 | 1                | 3,3±0,4                        | 1,1±0,2          | 0,9±0,1          | 23±1,5               |
|                   | 2                | 5,6±0,5                        | 2,9±0,2          | 1,6±0,1          | 27±0,1               |
|                   | 3                | 2,2±0,2                        | 1,3±0,2          | 0,7±0,1          | 26±1,7               |
| II                | 1                | 7,1±0,9                        | 2,3±0,3          | 1,7±0,2          | 49±1,4               |
|                   | 2                | 6,3±0,4                        | 4,7±0,3          | 2,6±0,2          | 57±1,9               |
|                   | 3                | 7,9±1,4                        | 4±0,6            | 1,9±0,3          | 54±2,2               |
| Северный склон    |                  |                                |                  |                  |                      |
| I                 | 1                |                                |                  |                  |                      |
|                   | 2                | 1,0±0,1                        | 0,7±0,1          | 0,4±0,1          | 20±0,6               |
|                   | 3                | 1,5±0,4                        | 1,3±0,2          | 0,6±0,1          | 23±1,3               |
| II                | 1                |                                |                  |                  |                      |
|                   | 2                | 4,6±0,9                        | 2,2±0,1          | 1,1±0,1          | 48±0,5               |
|                   | 3                | 11,7±1,8                       | 5,3±0,5          | 2,8±0,3          | 67±2,0               |

условно, усиливает промерзание почвы в зимний период и негативно сказывается на росте деревьев.

На северном склоне по представленным в табл. 4.5 материалам таксационные показатели деревьев на втором высотном уровне ниже, чем на третьем. Таким образом, в изменениях таксационных показателей, связанных с высотой над уровнем моря, наблюдается противоположная отмеченной выше по другим склонам, тенденция.

Видимо, это связано с значительно низкой абсолютной высотой высотных уровней северного склона, а также высокой разницей среднего возраста деревьев на втором и третьем высотном уровнях профиля.

В целом по уменьшению высоты и диаметра деревьев первой и второй возрастных групп, склоны (без учета северного) можно расположить в следующий ряд: южный - восточный – западный.

Таким образом, представленные выше материалы свидетельствуют, что молодые поколения деревьев при одинаковом возрасте в верхних частях экотона на склонах восточной, западной и южной экспозиций отличаются более высокими значениями морфометрических показателей и ШГК, чем в его нижних частях. В этой связи можно предположить, что в условиях Субарктики важнейшим фактором для роста деревьев является количество поступающей солнечной радиации и прогреваемость стволов. Эти факторы более значимы на верхних участках экотона с более низкой сомкнутостью крон древостоев. Данное предположение согласуется с имеющимися в специальной литературе материалами. В данном районе близкие по содержанию исследования проводились А.В. Беньковой с соавт. (Бенькова и др., 2012). Ими было обнаружено, что лучшие биометрическими показателями и более высокой интенсивностью радиального прироста отличаются деревья на границе «редколесье-тундра», как и в наших исследованиях.

Следует отметить, что с уменьшением высоты над уровнем моря средние морфометрические показатели совокупностей всех деревьев (древостоев) закономерно увеличиваются. Факт снижения их в этом направлении выявляется только при сопоставлении деревьев примерно одинакового возраста, произрастающих на разных высотных уровнях. Причем одностороннее, закономерное уменьшение морфометрических показателей и средней ШГК деревьев одинакового возраста по мере снижения высотной позиции древостоев наиболее выражено у более молодых поколений леса.

Таким образом, преимущество верхних частей экотона над нижними по показателям роста деревьев молодых поколений, обусловлено большим количеством по-

ступающей солнечной радиации и большей прогреваемостью стволов, а также меньшей внутривидовой конкуренцией между ними.

Как отмечалось выше, изменчивость прироста деревьев обусловлена влиянием различных факторов на формирование этого показателя. В настоящих исследованиях особый интерес представляет оценка влияния климатических условий отдельных месяцев, в частности, температуры воздуха на величину радиального прироста.

По результатам корреляционного анализа выявлено, что на восточном профиле на всех высотных уровнях, а в пределах их во всех возрастных группах деревьев на изменчивость индексов радиального прироста наибольшее положительное значимое влияние оказывает средняя температура июля. Рассчитанные для связи индексов ШГК со среднемесячной температурой июля коэффициенты корреляции ( $r$ ) изменяются в зависимости от высотных уровней в следующих пределах: для второй возрастной группы деревьев от 0,43 до 0,54, третьей – от 0,37 до 0,50, четвертой – от 0,39 до 0,48. Заметное положительное влияние на ШГК оказывают во второй возрастной группе деревьев средняя температура октября ( $r = 0,34 - 0,37$ ), в третьей – температура октября ( $r = 0,30$ ) и ноября ( $r = 0,26$ ), а в четвертой – января ( $r = 0,25$ ). На всех высотных уровнях во всех возрастных группах деревьев отрицательное влияние на прирост оказывает средняя температура мая ( $r$  изменяется от  $-0,19$  до  $-0,42$ ).

На южном склоне, как и на восточном, на всех высотных уровнях, а в пределах их во всех трех возрастных группах деревьев, на изменчивость индексов ШГК наибольшее положительное влияние оказывает средняя температура июля. В данном случае рассчитанные коэффициенты корреляции изменяются в зависимости от высотных уровней в следующих пределах: для второй возрастной группы деревьев от 0,42 до 0,57, третьей – от 0,48 до 0,50, четвертой – 0,46. Они более значительны, чем приведенные выше для восточного профиля.

Кроме июльских температур заметное положительное влияние на радиальный прирост оказывают влияние во второй возрастной группе деревьев средняя темпера-

тура июня ( $r = 0,30$ ), сентября ( $r = 0,34$ ) и октября ( $r = 0,30$ ), в третьей – температура июня ( $r = 0,22$ ), а в четвертой – также температура июня ( $r = 0,23-0,31$ ). Обнаруживается отрицательное влияние среднемесячной температуры мая на радиальный прирост деревьев второй и третьей возрастных групп ( $r$  в зависимости от высотных уровней изменяется от  $-0,26$  до  $-0,35$ ). У деревьев четвертой возрастной группы значимых связей индекса ШГК с майскими температурами не было выявлено.

Близкие тенденции в корреляции индексов ШГК деревьев со средней температурой воздуха разных месяцев наблюдаются на склонах западной и северной экспозиций. Так, для деревьев на западном склоне коэффициенты корреляции, рассчитанные для связи радиального прироста со среднемесячной температурой июля, изменяются в зависимости от высотных уровней в следующих пределах: для второй возрастной группы деревьев от  $0,35$  до  $0,51$ , третьей - от  $0,43$  до  $0,53$ , четвертой - от  $0,34$  до  $0,40$ .

Следует отметить, что полученные нами данные о более значимом вкладе июльских температур в формировании радиального прироста, по сравнению с температурами остальных месяцев, не противоречат результатам, полученным другими исследователями. Высокое влияние июнь-июльских температур на рост деревьев в северных широтах отмечается многими авторами (Шиятов, 2000; Харук, 2006; и др.).

В целом, теснота связей радиального прироста деревьев со среднемесячными температурами уменьшается с увеличением возраста деревьев. Вычисленные значения коэффициентов корреляции во второй возрастной группе выше, чем в третьей, а в третьей – выше, чем в четвертой. Причем эта закономерность характерна как для положительных связей (в частности, для связи прироста со средней температурой июля), так и отрицательных (в частности, для связи прироста со средней температурой мая). Таким образом, температура воздуха оказывает большее влияние на изменчивость радиального прироста более молодых деревьев.

При прочих равных условиях коэффициенты корреляции, рассчитанные для связей радиального прироста деревьев со среднемесячными температурами,

наибольшими значениями характеризуются на южном склоне, а наименьшими – на западном и северном склонах. Восточный склон в этом отношении занимает промежуточное положение. В пределах склонов величина данного показателя уменьшается со снижением высоты над уровнем моря. Это дает основание предположить, что вклад температуры воздуха в формирование радиального прироста повышается с увеличением высоты над уровнем моря. Имеющиеся отклонения от этих закономерностей можно объяснить особенностями выборок экспериментального материала, использованных при исследовании связей.

### **Выводы:**

Представленные в главе материалы позволяют сделать следующие обобщения и выводы.

В течение последнего столетия климат в районе исследований стал более теплым и влажным. Среднегодовая температура воздуха за период с 2006 по 2017 г.г. повысился на  $1,03^{\circ}\text{C}$ . Причем, повышение температуры воздуха в летний период (на  $1,4^{\circ}\text{C}$ ) более значительно, чем в холодный (на  $1,1^{\circ}\text{C}$ ) и зимний (на  $0,5^{\circ}\text{C}$ ). В разрезе месяцев в наибольшей степени увеличились температуры июня (на  $2,5^{\circ}\text{C}$ ), марта (на  $2,4^{\circ}\text{C}$ ) и декабря (на  $2,4^{\circ}\text{C}$ ). Увлажнение климата произошло в основном за счет увеличения количества осадков в зимние месяцы (на 64 мм или 51%). Среднее годовое количество осадков за исследуемый период увеличилось на 82 мм (14%).

Наиболее благоприятный для роста растений температурный режим складывается в нижней части ЭВГДР (в редколесье), примыкающий к сомкнутым насаждениям. Здесь температуры воздуха весенних и летних месяцев, наиболее важные для роста древесных растений, характеризуются более высокими значениями, чем в редине и даже в произрастающем ниже сомкнутом насаждении.

По изменению температуры почвы в связи с высотой над уровнем моря месяцы календарного года можно условно распределить на три группы. Для месяцев первой группы (июня и июля) характерно закономерное увеличение температуры почвы по

мере продвижения вверх по склону. Средние для этих двух летних месяцев температуры составляют: в сомкнутом лесу  $7,8^{\circ}\text{C}$ , в редколесье –  $10,0^{\circ}\text{C}$ , в редице –  $12,0^{\circ}\text{C}$  и в горной тундре –  $12,9^{\circ}\text{C}$ . Такая динамика температуры почвы в этот период связана со степенью затенения почвы кронами деревьев и ольховника, которая закономерно уменьшается по мере продвижения вверх по склону.

Месяцы второй группы, холодного периода года (октябрь, ноябрь, декабрь, январь, февраль, март и апрель), характеризуются закономерным уменьшением температуры почвы по мере продвижения вверх по склону. В данном случае такое положение объясняется существенным уменьшением в этом направлении высоты снежного покрова. Чем выше высота снега, тем в меньшей степени промерзает почва.

Месяцы третьей группы (май, август и сентябрь) выделяются отсутствием одностороннего, устойчивого изменения температуры почвы с повышением или понижением высоты над уровнем моря.

ЭВГДР на исследуемых склонах характеризуется высокой изменчивостью высоты снежного покрова. Отдельные участки экотона по величине этого показателя могут отличаться более чем в 8 раз. На процесс накопления снега в экотоне оказывают влияние экспозиция склона, высота над уровнем моря, характер растительности, особенности мезорельефа и ветрообдуваемость участков и др. Более многоснежным является северный склон, на котором средняя высота снега по высотным уровням изменяется от 88 до 161 см. Самыми низкими средними значениями мощности снега характеризуется восточный профиль (от 34 до 132 см). Южный и западный склоны по этому показателю занимают промежуточное положение. В пределах склона высота снежного покрова существенно варьирует в зависимости от высоты над уровнем моря. На восточном и западном склонах наблюдается достаточно устойчивое, одностороннее снижение толщины снега по мере повышения высотной позиции участков. На двух остальных склонах эта закономерность нарушается из-за особенностей мезорельефа и воздействия ветров.

Изменения древесно-кольцевых хронологий осреднённых радиальных приростов на всех профилях имеют общие закономерности: деревья молодых поколений (до 80 лет) характеризуются ярко выраженными трендами на увеличение осреднённых приростов, а более старших поколений, наоборот, отличаются трендами к уменьшению.

Средняя ШГК по всем построенным хронологиям изменяется от 0,125 до 1,003 мм. У деревьев, принадлежащих к одной возрастной группе (в которой разница в возрасте не превышает 40 лет), этот показатель в целом уменьшается со снижением высоты над уровнем моря и увеличением густоты древостоев. Наиболее отчетливо это уменьшение проявляется в первой (возраст деревьев до 40 лет) и во второй (возраст от 41 до 80 лет) возрастных группах. Так, на восточном склоне при переходе от первого уровня (редины) к третьему (верхняя граница сомкнутого леса) средняя ШГК уменьшается у деревьев первой возрастной группы в 3,1 раза, а у второй группы - 1,8 раза. На западном склоне это уменьшение выражено еще в большей степени: в первой возрастной группе в 4,4 раза, во второй - в 2,0 раза. Устойчивые, односторонние изменения средней ШГК в связи с высотой над уровнем моря, у деревьев старших возрастных групп (возраст деревьев более 80 лет), не обнаруживаются.

По уменьшению морфологических показателей и средней ШГК деревьев первой и второй возрастных групп, склоны можно расположить в следующий ряд: южный - восточный - западный - северный. Таким образом, лучшими условиями для роста деревьев и формирования годичного прироста по радиусу, характеризуется южный склон, а худшими - северный.

Коэффициент вариации ШГК по всем построенным хронологиям приростов изменяется в диапазоне от 26 до 68,3%. При прочих равных условиях наиболее высокими значениями этого показателя характеризуются первый и второй возрастные группы деревьев и первый и второй высотные уровни исследуемых профилей.

Все полученные хронологии являются чувствительными (значения показателя выше 0,4 во всех случаях), что позволяет использовать их для дендроклиматического

анализа. На исследуемых объектах средний коэффициент чувствительности для индексированных значений ШГК изменяется в пределах от 0,40 до 0,70. Этот показатель во всех возрастных группах деревьев на исследуемых профилях имеет тенденцию к увеличению по мере снижения высоты над уровнем моря. При прочих равных условиях в старших возрастных группах деревьев он выше, чем в младших.

Средний коэффициент корреляции показал высокую синхронность ШГК с воздействием внешнего фактора, общего для всех деревьев в пределах исследуемых объектов. Значения среднего коэффициента межсерияльной корреляции по всем построенным хронологиям приростов изменяются в диапазоне от 0,36 до 0,72. Наблюдается тенденция повышения этого показателя с увеличением возраста деревьев. При прочих равных условиях коэффициент межсерияльной корреляции хронологий приростов у деревьев одного возраста имеет тенденцию к понижению с уменьшением высотной позиции древостоев.

Молодые поколения деревьев при одинаковом возрасте в верхних частях экотона на склонах восточной, западной и южной экспозиций отличаются более высокими значениями морфометрических показателей и ШГК, чем в его нижних частях. В этой связи можно предположить, что в условиях Субарктики важнейшим фактором для роста деревьев является количество поступающей солнечной радиации и прогреваемость стволов. Эти факторы более значимы на верхних участках экотона с более низкой сомкнутостью крон.

Следует отметить, что с уменьшением высоты над уровнем моря средние морфометрические показатели совокупностей всех деревьев (древостоев) закономерно увеличиваются. Факт снижения их в этом направлении выявляется только при сопоставлении деревьев примерно одинакового возраста, произрастающих на разных высотных уровнях.

На всех высотных уровнях исследуемых склонов, а в пределах их во всех возрастных группах деревьев на величину индексов радиального прироста наибольшее положительное, значимое влияние оказывает средняя температура июля. Положи-

тельное влияние на формирование радиального прироста также оказывают влияние у деревьев второй возрастной группы температуры сентября и октября, третьей группы - температуры октября и ноября, а четвертой – июня. Майские температуры в большинстве случаев оказывают отрицательное влияние на прирост деревьев.

## **Глава 5. Особенности формирования и возрастная структура древостоев лиственницы в высокогорьях плато Путорана**

### **5.1 Особенности формирования лиственничников**

В исследованиях верхней границы леса значительный интерес представляет оценка особенностей заселения древесной растительностью горно-тундровых (ранее безлесных) территорий, отличающихся экспозицией и крутизной склонов, мощностью и степенью увлажнения почв, характером отложения снега и т. д. Определение возраста всех деревьев лиственницы на исследуемых объектах позволяет построить ряды распределения произрастающих в настоящее время деревьев по календарным годам их появления. Однако следует отметить, что на точность определения возраста деревьев оказывают влияние многие факторы: форма поперечного сечения ствола, ее эксцентричность, различия в возрасте достижения подростом высота бурения (5–20 см), ошибки в установлении расстояния от гипокотеля до высоты бурения и др. Поэтому, как отмечалось выше, мы не можем утверждать, что возраст всех деревьев определен с точностью до одного года. В связи с вышеизложенным, для получения более обоснованных и надежных результатов на каждом высотном уровне исследуемых профилей деревья лиственницы были распределены по 5-летним возрастным классам. Затем устанавливался календарный год появления деревьев для всех установленных возрастных классов. Такой подход в распределении произрастающих в настоящее время деревьев по календарным периодам их появления применялся ранее и другими исследователями (Бартыш, 2008; Моисеев и др., 2010; Григорьев, 2011). Полученные, таким образом, материалы позволяют достаточно надежно установить, как начало заселения лиственницей высотных уровней исследуемых профилей, так и выделить периоды интенсивной экспансии древесной растительности в горную тундру.

Достаточно объективное представление об особенностях формирования древостоев на исследуемых профилях в ретроспективе можно получить на основе анализа

распределения ныне растущих деревьев по периодам их появления на разных высотных уровнях (рисунки 5.1–5.4)

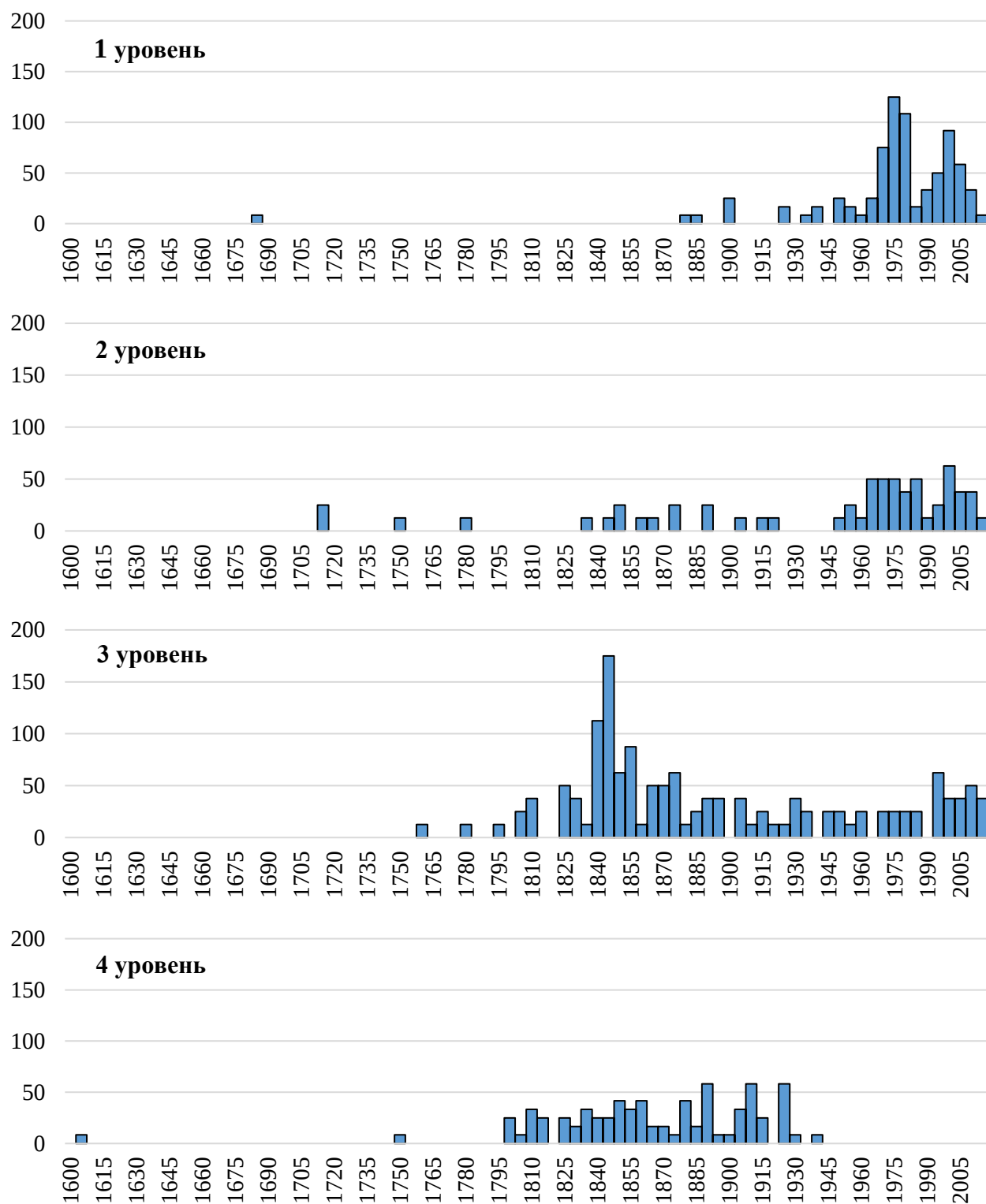


Рисунок 5.1 – Распределение ныне растущих деревьев лиственницы по периодам их появления на различных высотных уровнях западного профиля

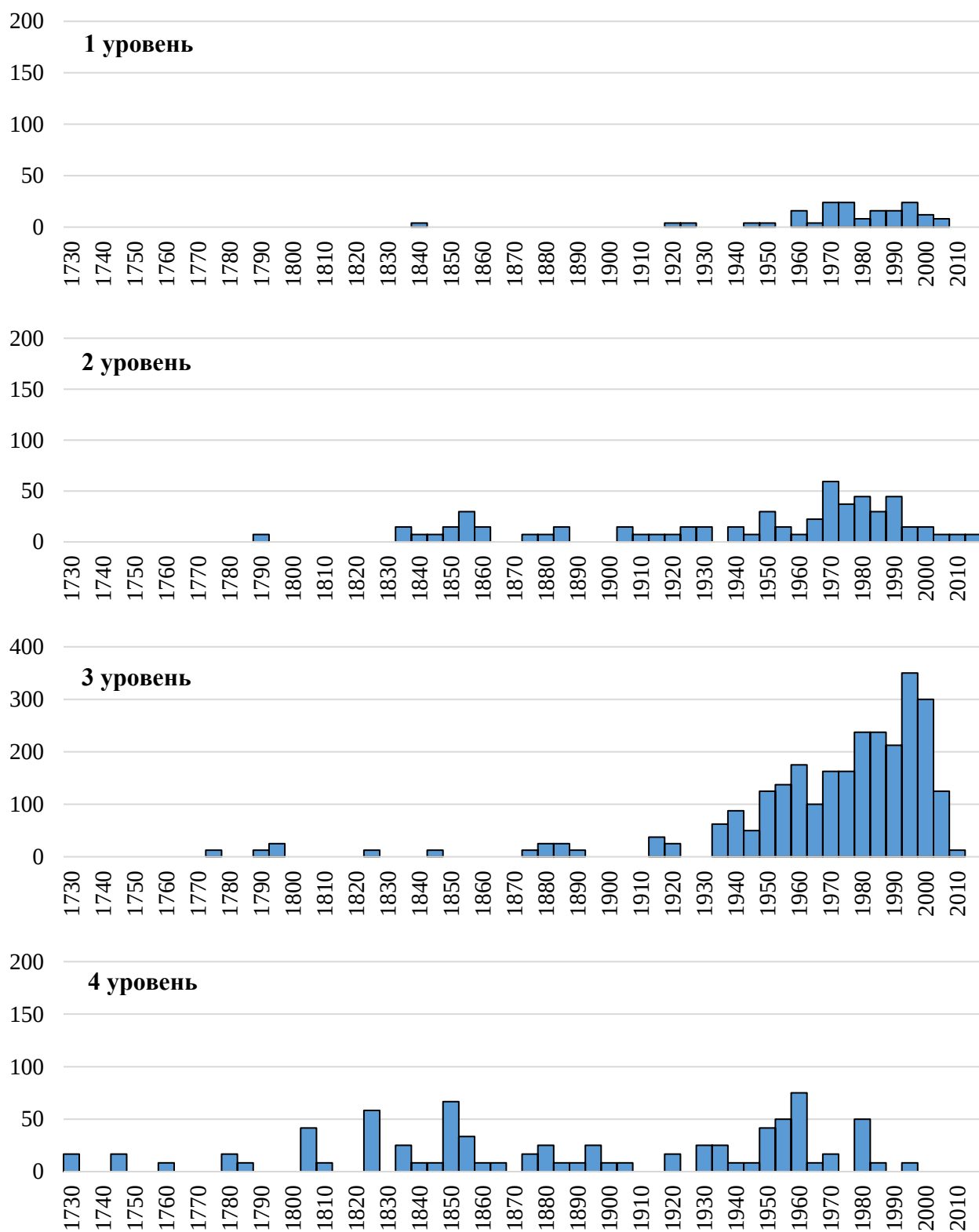


Рисунок 5.2 – Распределение ныне растущих деревьев лиственницы по периодам их появления на различных высотных уровнях восточного профиля

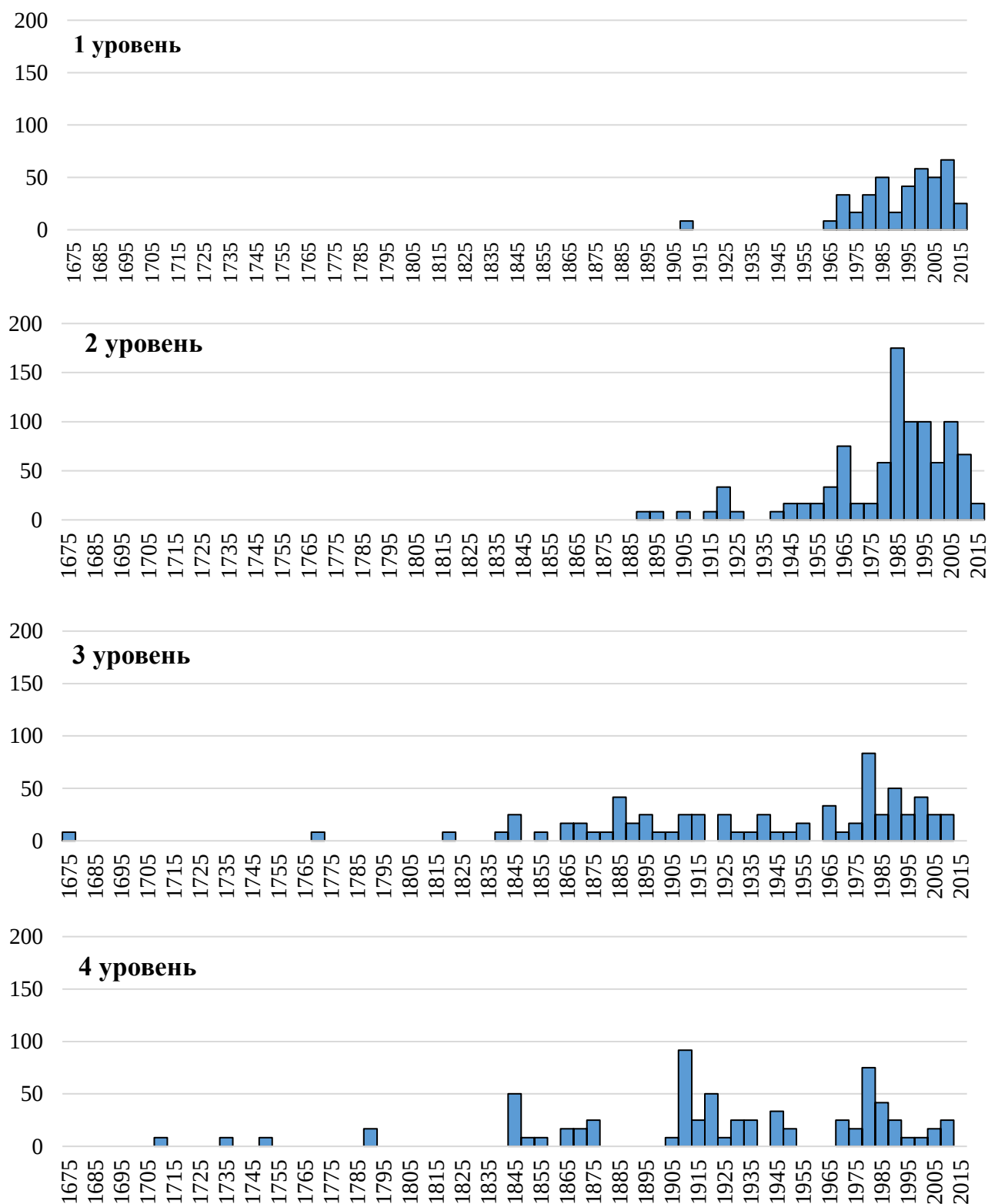


Рисунок 5.3 – Распределение ныне растущих деревьев лиственницы по периодам их появления на различных высотных уровнях южного профиля

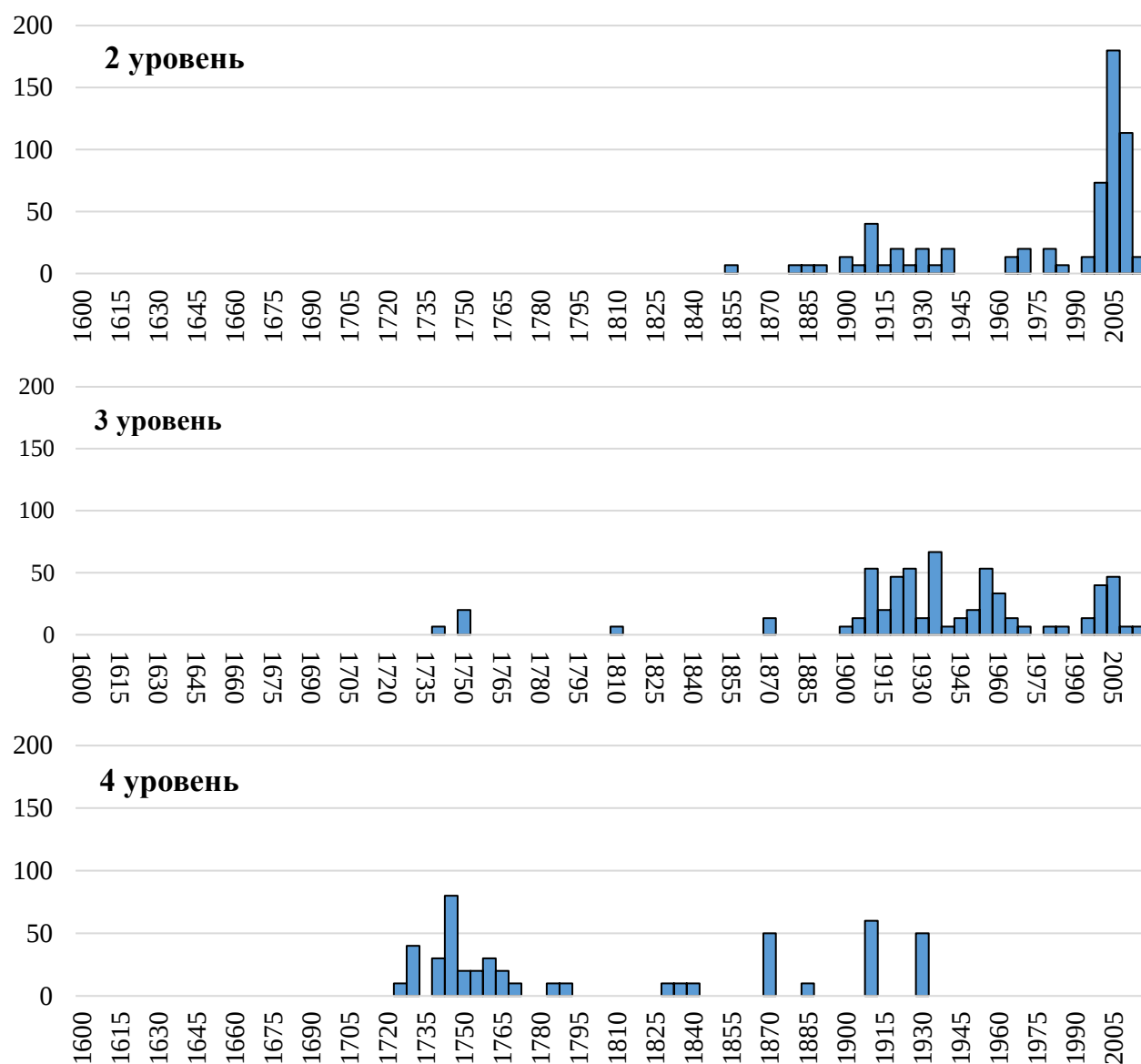


Рисунок 5.4 – Распределение ныне растущих деревьев лиственницы по периодам их появления на различных высотных уровнях северного профиля

Графические данные, представленные на рисунках 5.1–5.4 позволяют отметить следующее. Заселение лиственницей западного склона началось в начале XVII века. Об этом свидетельствуют сохранившиеся единичные деревья на нижнем уровне, появившиеся в тот период. Начало массового заселения данного уровня лиственницей датируется концом XVIII века. В последующем здесь наблюдалось достаточно равномерное увеличение густоты лиственничного древостоя вплоть до середины XX века.

На третьем уровне западного профиля появление лиственницы датируется серединой XVIII века. Однако, наиболее активное возобновление лиственницы наблюдалось с 1825 по 1875 годы. За этот 50-летний период появилось около 47,5% ныне растущих деревьев. В последующие годы наблюдалось поступательное увеличение густоты лиственничников, которое продолжается и в настоящее время.

Массовое появление лиственницы на первом и втором уровнях западного профиля наблюдается с середины XX века по настоящее время. Доля деревьев, появившихся в этот период от общего их количество составляет: на первом уровне 88,0%, а на втором – 69,1%.

Заселение лиственницей восточного склона началось со второй четверти XVIII века, то есть значительно позднее, чем западного. Здесь самые старые сохранившиеся деревья появились на нижнем уровне только в 1730 году. С этого времени вплоть до конца XX века наблюдается процесс постепенного зарастания данного уровня лиственницей, который характеризуется чередованием периодов с наличием и отсутствием возобновления. Причем выделить периоды массового возобновления достаточно сложно.

На третьем уровне восточного профиля время появления самых старых ныне растущих деревьев датируется 1775 годом. С 1775 по 1930 годы на этом уровне наблюдался вяло текущий процесс зарастания территории лиственницей с чередованием периодов с наличием и отсутствием возобновления. С 1935 года фиксируется всплеск возобновления, интенсивность которого заметно возрастает до конца XX века.

На первом и втором уровнях восточного профиля первые деревья появились в середине XIX и в конце XVIII веков, соответственно. Однако, лесовозобновление приобретает достаточно устойчивый характер (без разрывов) значительно позднее: на втором уровне с 1940 года, а на первом – с 1960 года.

На четвертом высотном уровне южного профиля лесовозобновление лиственницей началось в начале XVIII века. Оно до середины XIX века носило весьма не-

устойчивый характер: периоды лесовозобновления чередовались затяжными периодами с отсутствием возобновления. Для данного объекта характерны три периода активного возобновления лиственницы: первый – с 1845 по 1875 годы; второй – с 1905 по 1955 годы и третий – с 1970 по 2015 годы. Практически все ныне растущие деревья появились в эти периоды.

На третьем уровне южного профиля, несмотря на раннее появление лиственницы (1675 год), возобновление этой породы приобрело устойчивый характер лишь с 1865 года. Наиболее активное заселение уровня наблюдалось в период с 1980 по 2010 годы.

На первом и втором высотном уровнях южного профиля первые лиственницы появились в начале XX и в конце XIX веков, соответственно. Причем на втором уровне лесовозобновление приобретает достаточно устойчивый характер (без разрывов) только с 1940 года и характеризуется четко выделяющимся активным периодом – с 1980 по 2010 годы. Заселение лиственницей первого высотного уровня южного профиля достаточно активно началось с 1965 года, и оно продолжается по настоящее время.

На северном профиле первые деревья лиственницы появились на четвертом уровне во второй четверти XVIII века. Здесь выделяется период достаточно активного возобновления – с 1745 по 1780 годы. После этого периода процесс лесовозобновления характеризовался с частыми и продолжительными разрывами. На втором и третьем высотном уровнях северного профиля первые лиственницы появились в середине XIX и середине XVIII веков, соответственно. Массовое заселение лиственницей третьего уровня началось с 1915 года, а второго – значительно позднее (с 1995 года).

В целом, представленные выше материалы позволяют сделать следующие обобщения. В исследуемом районе в экотоне верхней границы леса растущие в настоящее время деревья лиственницы резко отличаются по возрасту (периодам появления). Процесс лесовозобновления на всех объектах очень растянут во времени,

особенно на нижних уровнях, на которых он продолжается уже несколько столетий. Устойчивое (без разрывов), достаточно активное возобновление лиственницы на первом уровне исследуемых профилей началось в 1950–1965 годах, а на втором – в 1940–1960 годах, то есть чуть раньше. На наш взгляд, это связано с улучшением климатической обстановки в последние 70–80 лет. Интенсивное лесовозобновление с середины XX века в горной тундре и связанное с ним смещение вверх верхней границы леса, отмечается в различных регионах мира (Моисеев, 2011).

Формирование абсолютно разновозрастных древостоев (с разницей в возрасте групп деревьев более чем на два класса возраста) в экотоне верхней границы леса, главным образом, объясняется складывающимися в верхних частях склонов условиями для лесовозобновления. Несмотря на улучшение климатической обстановки в последние столетия, условия для возобновления леса в экотоне остаются крайне сложными. Высокогорья характеризуются жесткими температурным и ветровым режимами, древостои в них отличаются пониженной семенной продуктивностью (Горяева, 2008), а почвы – низким плодородием, малой мощностью, неустойчивым режимом увлажнения, высокой каменистостью и скелетностью. В таких условиях появление всходов и самосева не гарантирует их дальнейшего участия в лесовозобновительном процессе. В этом возрасте древесные растения наиболее уязвимы воздействию неблагоприятных экологических факторов и массово гибнут.

Следует также отметить, что лиственница, как и многие другие древесные породы, обильно плодоносит не каждый год, а через определенные промежутки времени (как правило, через 4–6 лет). По данным А.В. Горяевой (2008) и Н.Б. Кошкиной (2008) на Урале в условиях верхней границы леса формирование молодых поколений леса наблюдается лишь после семенных годов. Всходы и подрост, появившиеся в промежутке между ними, в формировании древостоев не участвуют: они по причине их малого количества не сохраняются, как правило, полностью погибают.

Только при определенном (относительно благоприятном) сочетании факторов внешней среды после семенных годов возможны выживание и успешный рост всхо-

дов и подроста. В связи с этим процесс лесовозобновления в экотоне растягивается на долгие годы и формируются абсолютно разновозрастные (с разницей в возрасте групп деревьев более чем на два класса возраста) древостои. Таким образом, разновозрастность древостоев в верхней границе леса может рассматриваться как фактор их выживаемости и устойчивости в крайне неблагоприятных лесорастительных условиях.

Различия между высотными уровнями одного и того же профиля, а также одноименными уровнями разных профилей по густоте древостоев, скорости и характеру лесовозобновления, на наш взгляд, связаны с их локальными условиями местопроизрастания. И здесь определяющее значение могут иметь особенности снегонакопления и мощность снежного покрова на исследуемых объектах, которые определяют термический режим почв зимой и их увлажнение в вегетационный период, а также степень повреждения снежной абразией верхних частей растений, оказывающихся выше уровня снега (Моисеев, 2011; Григорьев, 2011).

## **5.2. Возрастная структура древостоев лиственницы**

В соответствии с программой исследования на всех ПП высотных профилей у всех деревьев лиственницы по буровым кернам определялся их возраст. Эти данные (ряды распределения количества деревьев по возрасту) позволяют оценить степень дифференциации деревьев по возрасту и возрастную структуру лиственничников на исследуемом стационаре. В специальной литературе имеются сведения о том, что возрастное строение древостоев объективно можно оценить только при установлении возраста всех их деревьев (Шанин, 1967). Наши материалы позволяют это сделать.

Результаты математико-статистической обработки рядов распределения деревьев лиственницы по возрасту показаны в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Основные статистические показатели рядов распределения деревьев по возрасту в исследуемых лиственничниках

| Высотный уровень  | Минимальное значение, лет | Максимальное значение, лет | Среднее значение, лет | Ошибка среднего, лет | Показатель эксцесса | Показатель асимметрии | Коэффициент вариации, % | Точность опыта, % |
|-------------------|---------------------------|----------------------------|-----------------------|----------------------|---------------------|-----------------------|-------------------------|-------------------|
| Западный профиль  |                           |                            |                       |                      |                     |                       |                         |                   |
| Первый            | 22                        | 145                        | 59                    | 4                    | 2,19                | 1,55                  | 47,9                    | 6,1               |
| Второй            | 20                        | 181                        | 99                    | 10                   | -1,49               | 0,28                  | 52,4                    | 10,5              |
| Третий            | 27                        | 268                        | 154                   | 5                    | -0,04               | -0,57                 | 30,8                    | 3,1               |
| Четвертый         | 75                        | 274                        | 159                   | 4                    | -0,60               | 0,18                  | 25,9                    | 2,8               |
| Восточный профиль |                           |                            |                       |                      |                     |                       |                         |                   |
| Первый            | 26                        | 102                        | 50                    | 3                    | 1,56                | 1,15                  | 36,8                    | 7,0               |
| Второй            | 24                        | 185                        | 91                    | 7                    | -1,17               | 0,60                  | 56,8                    | 7,7               |
| Третий            | 23                        | 226                        | 72                    | 4                    | 4,56                | 1,99                  | 55,8                    | 6,0               |
| Четвертый         | 24                        | 289                        | 133                   | 7                    | -0,90               | 0,35                  | 52,3                    | 5,6               |
| Северный профиль  |                           |                            |                       |                      |                     |                       |                         |                   |
| Первый            | —                         | —                          | —                     | —                    | —                   | —                     | —                       | —                 |
| Второй            | 29                        | 171                        | 95                    | 6                    | -0,26               | -0,16                 | 35,2                    | 6,3               |
| Третий            | 26                        | 213                        | 90                    | 4                    | 2,85                | 0,52                  | 34,5                    | 4,1               |
| Четвертый         | 95                        | 302                        | 216                   | 11                   | -1,50               | -0,49                 | 35,0                    | 5,1               |
| Южный профиль     |                           |                            |                       |                      |                     |                       |                         |                   |
| Первый            | 20                        | 114                        | 40                    | 3                    | -1,34               | -0,24                 | 31,1                    | 7,3               |
| Второй            | 20                        | 133                        | 52                    | 3                    | 1,56                | 1,42                  | 49,5                    | 5,4               |
| Третий            | 22                        | 205                        | 99                    | 6                    | -0,96               | 0,19                  | 47,7                    | 5,7               |
| Четвертый         | 32                        | 235                        | 112                   | 6                    | -0,22               | 0,41                  | 42,9                    | 5,3               |

Известно, что выборочные наблюдения характеризуются ошибками репрезентативности (Рокицкий, 1973; Свалов, 1977; Нагимов и др., 2021; и др.). По величине ошибки среднего значения можно сделать заключение, насколько вычисленное выборочное среднее отличается от средней генеральной совокупности. Причем на величину ошибки выборочной средней оказывают влияние как однородность собранного материала (чем меньше степень рассеивания отдельных вариантов вокруг своей

средней, тем меньше ошибка репрезентативности), так и число измерений (ошибка уменьшается с увеличением числа измерений). Вычисленные и представленные в табл. 5.1 данные, свидетельствуют, что достоверность средних значений (среднего возраста) на всех исследуемых объектах доказывается на 5%-ном уровне ( $t_{\text{факт.}} > t_{0,05}$ ). При оценке достоверности средних значений возраста с учетом установленного числа степеней свободы в исследуемых рядах по таблице Стьюдента определялась величина критерия  $t_{0,05}$  (Рокицкий, 1973).

На основе представленных материалов можно сделать заключение, что выборочные совокупности (объемы эмпирического материала) обеспечивают достаточно устойчивые результаты. Точность опыта соответствует требованиям, предъявляемым при выполнении лесоучетных работ. По отдельным объектам этот показатель изменяется от 2,8 до 10,5%. Только на одном объекте из пятнадцати, ошибки среднего значения превышают 10%.

Представление об изменчивости возраста деревьев и возрастной структуры древостоев можно получить на основе анализа величины амплитуды возраста, характеризующейся пределами изменения данного показателя. В целом, на всех профилях диапазон изменения возраста лиственницы увеличивается с уменьшением абсолютной высоты расположения древостоев. Имеющиеся отклонения от этой закономерности, на наш взгляд, объясняются с особенностями выборки. Наибольшим диапазоном варьирования возраста деревьев (от 24 до 289) характеризуются лиственничники на четвертом уровне восточного профиля, а наименьшим (от 26 до 102) – лиственничники первого уровня этого же профиля. Представленные в табл. 5.1 материалы показывают, что лиственничники на исследуемых профилях относятся к категории абсолютно разновозрастных древостоев. Известно, что к абсолютно разновозрастным относятся древостои, в которых разница в возрасте групп деревьев составляет более двух классов возраста (Луганский и др., 2015).

Средние значения возраста деревьев лиственницы на всех профилях уменьшаются (за редким исключением) по мере продвижения в гору: на западном профиле от

119 до 59 лет, на восточном – от 133 до 50, на северном – от 216 до 95 и на южном – от 112 до 40 лет

При оценке таксационной структуры древостоев и дифференциации составляющих их деревьев особое внимание уделяется изучению изменчивости (степени вариации) различных характеристик деревьев, устанавливаемой по значению коэффициента варьирования признака (Луганский, Нагимов, 1994).

Коэффициент вариации возраста деревьев существенно различается по объектам исследования. Его значения изменяются в диапазоне от 25,9% (на четвертом уровне западного профиля) до 56,8% (на втором уровне восточного профиля). В лесоводственно-биологических исследованиях для оценки изменчивости показателей растений пользуются или эмпирической шкалой уровней изменчивости количественных признаков растений С.А. Мамаева (1970), или рекомендациями М.Л. Дворецкого (1971). При сопоставлении значений коэффициента вариации возраста деревьев лиственницы на исследуемых объектах с данными шкалы С.А. Мамаева получены следующие результаты: изменчивость возраста лиственницы на восьми объектах (первом и втором уровнях западного профиля, на втором, третьем и четвертом уровнях восточного профиля и на втором, третьем и четвертом уровнях южного профиля) соответствует очень высокому уровню (более 40%), на шести объектах (на третьем уровне западного профиля, на первом уровне восточного профиля, на первом уровне южного профиля и на втором, третьем и четвертом уровнях северного профиля) – высокому (от 31 до 40%) и на одном объекте (на четвертом уровне западного профиля) – повышенному уровню (от 21 до 30%).

Высокая изменчивость возраста деревьев в экотонах верхней границы леса отмечаются и другими исследователями. Так, в высокогорных условиях в лиственничниках Приполярного Урала этот показатель изменяется от 38 до 45%, в лиственничниках Среднего Урала – от 33 до 56%, а в ельниках Южного Урала – от 21 до 33% (Бабенко, 2006; Бартыш, 2008; Григорьев, 2011). Указанные авторы признают, что

степень дифференциации древесных растений по возрасту в высокогорьях существенно выше, чем в равнинных условиях.

Как отмечалось выше, высокая изменчивость возраста деревьев и формирование абсолютно разновозрастных древостоев (с разницей в возрасте групп деревьев более чем на два класса возраста) в экотоне верхней границы леса объясняется складывающимися в верхних частях склонов условиями для лесовозобновления, которые несмотря на улучшение климатической обстановки в последние столетия, в высокогорьях остаются крайне сложными.

Форму кривых распределения количества деревьев в исследуемых совокупностях по тем или иным таксационным показателям оценивают на основе показателей асимметрии и эксцесса рядов (Митропольский, 1969; Рокицкий, 1973; Свалов, 1977; и др.). По данным табл. 5.1. четких закономерностей в изменении этих показателей, связанных с экспозицией склонов и высотным положением древостоев, не наблюдается. По абсолютным значениям показателей асимметрии и эксцесса можно констатировать, что изучаемые эмпирические ряды в подавляющем большинстве случаев существенно отличаются от нормального распределения Гаусса-Лапласа. При такой разновозрастности древостоев это вполне ожидаемый результат.

Наглядно распределение деревьев лиственницы по возрасту в разрезе высотных уровней исследуемых профилей показано на рис. 5.5–5.8. При построении графиков деревья были сгруппированы по классам возраста.

Анализ графических данных позволяет достаточно объективно оценить возрастное строение исследуемых древостоев. Большинство исследователей для оценки строения древостоев по возрасту считают наиболее удачной и совершенной схему типов возрастной структуры, предложенную Г.Е. Коминым и И.В. Семечкиным (Комин, 1963; Комин, Семечкин, 1970). В зависимости от пространственного размещения деревьев разного возраста и структуры популяций исследуемой породы указанные авторы выделяют шесть типов возрастной структуры древостоев:

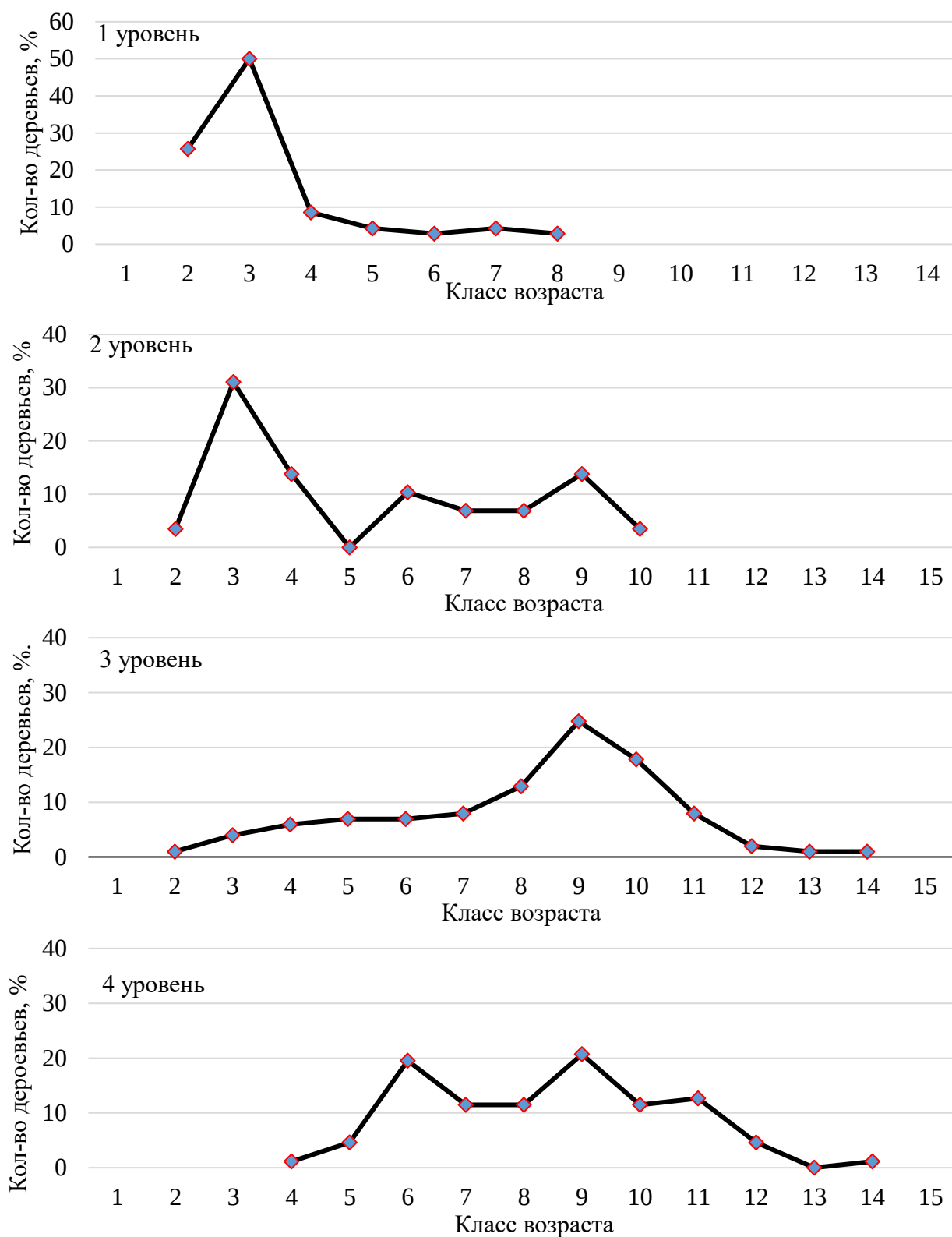


Рисунок 5.5 – Распределение деревьев лиственницы по классам возраста на различных высотных уровнях западного профиля

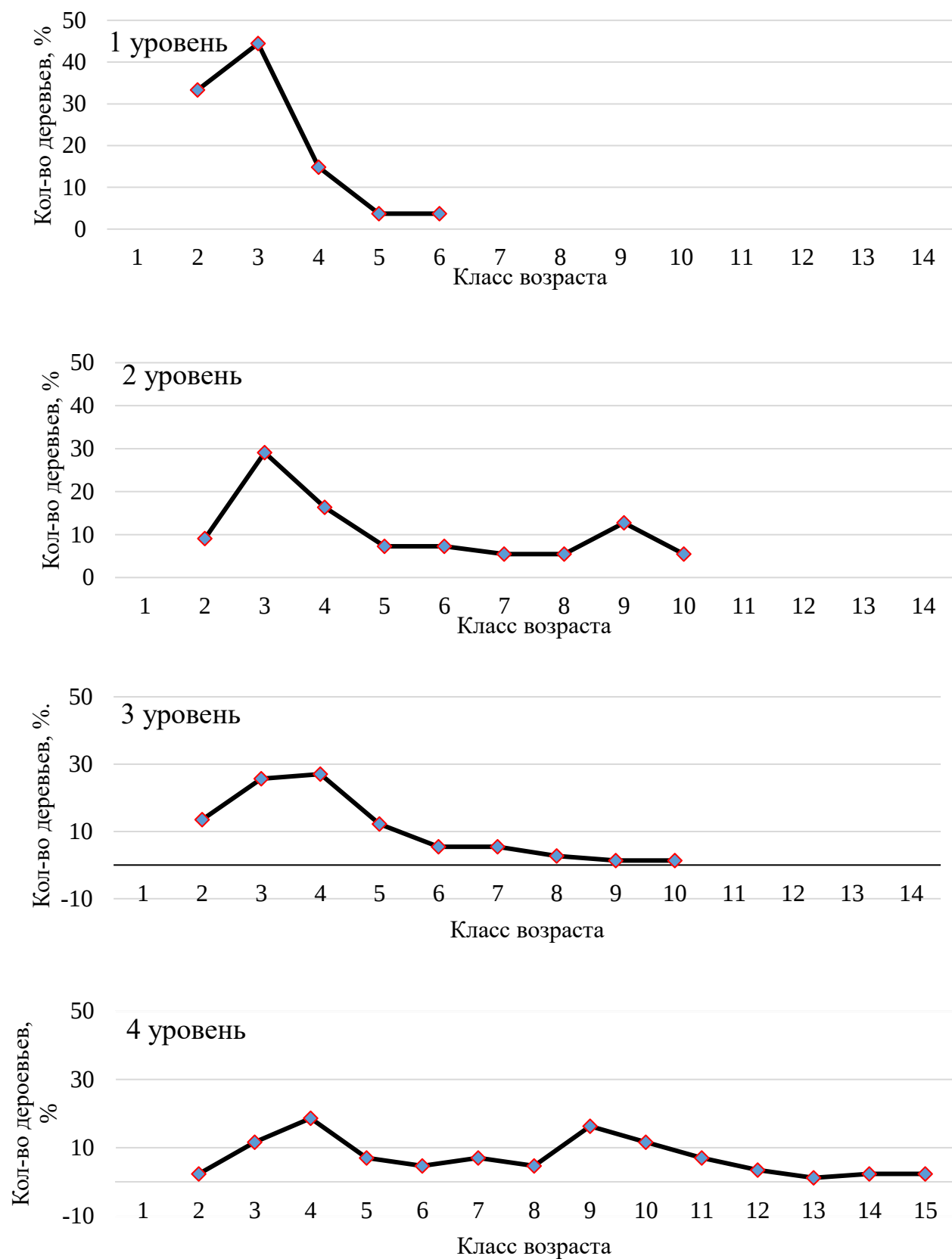


Рисунок 5.6 – Распределение деревьев лиственницы по классам возраста на разных высотных уровнях восточного профиля

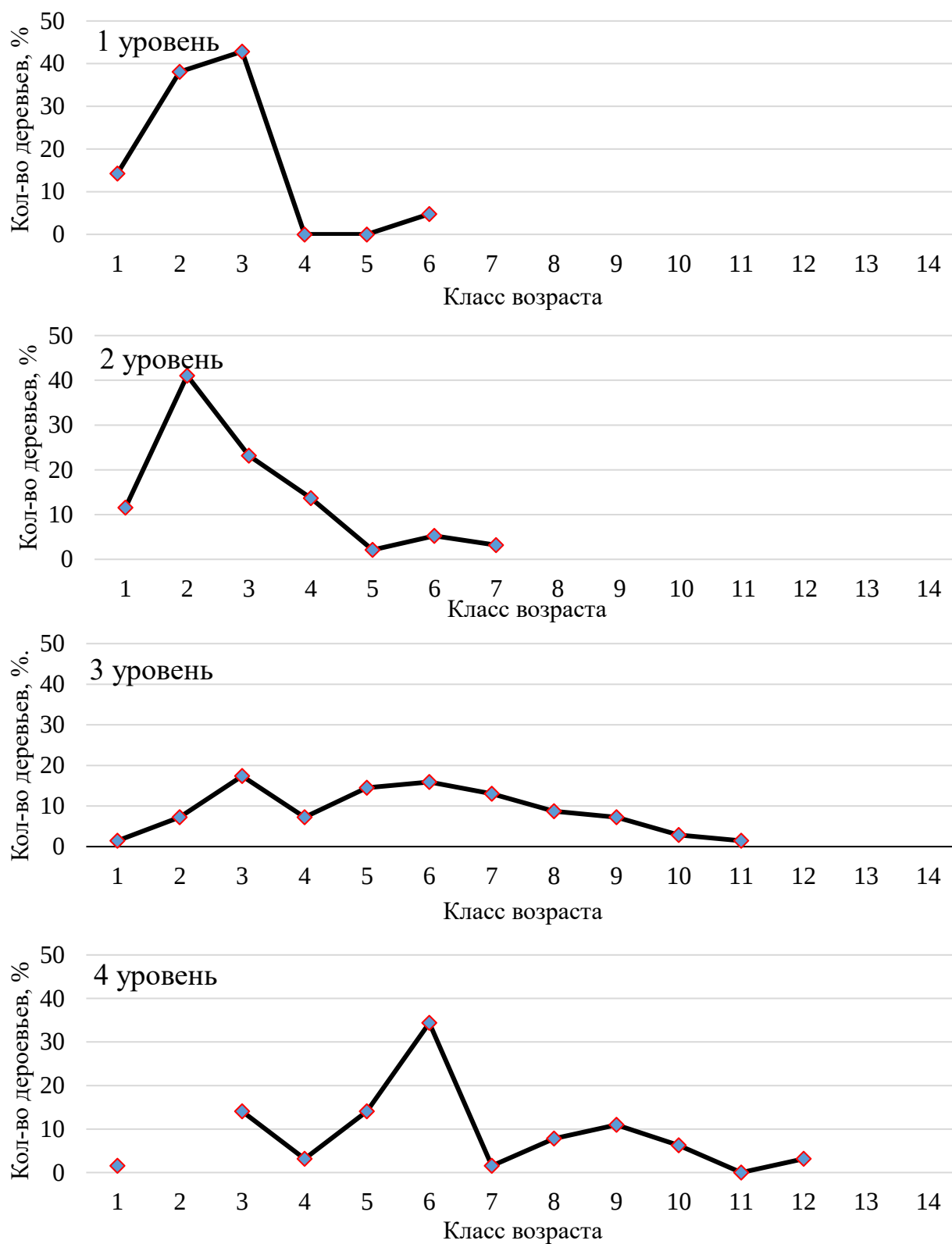


Рисунок 5.7 – Распределение деревьев лиственницы по возрасту на разных высотных уровнях южного профиля

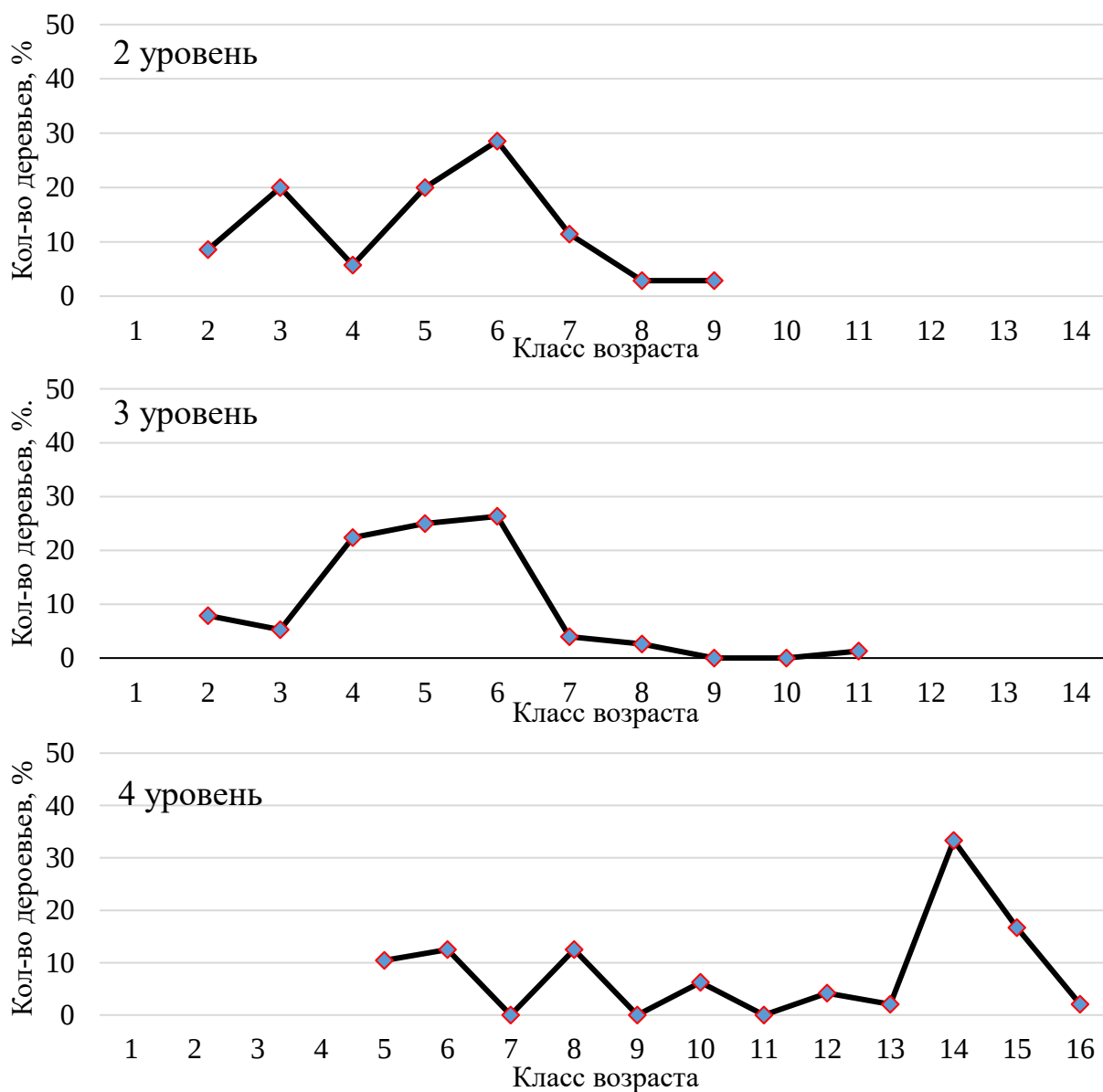


Рисунок 5.8 – Распределение деревьев лиственницы по возрасту на разных высотных уровнях северного профиля

- абсолютно одновозрастные** (древостой из деревьев одного возраста);
- условно разновозрастные** (древостой образованы одним поколением деревьев, но с большой амплитудой колебания возраста; при этом отсутствует разрыв между молодым и старшим поколениями);
- ступенчато разновозрастные** (в древостоях несколько поколений, резко обособленных друг от друга с полным отсутствием промежуточных возрастов);

**-циклично разновозрастные** (в древостоях несколько поколений без полных разрывов между ними, наблюдается лишь значительное уменьшение количества деревьев с промежуточным возрастом; наличие нескольких максимумов и минимумов в распределении деревьев по возрасту);

**-абсолютно разновозрастные** (в древостоях несколько поколений, распределение деревьев по возрасту достаточно равномерное (без нарушений), ясно выраженных границ между возрастными поколениями не наблюдается, имеющиеся циклы короткие – до 15 лет)

По мнению авторов, разновозрастные древостои могут состоять из морфологически выраженных или невыраженных поколений леса.

В соответствии с данной, обобщенной схемой типов возрастной структуры древостоев Г.Е. Комина и И.В. Семечкина (1970), в исследуемом экотоне верхней границы леса наибольшее распространение имеют циклично разновозрастные и ступенчато разновозрастные древостои. Циклично разновозрастными древостоями представлены второй и четвертый высотные уровни восточного профиля, первый уровень западного, второй и третий уровни южного и второй уровень северного профиля. Ступенчато разновозрастный тип возрастной структуры характерен для древостоев третьего высотного уровня восточного профиля, второго и четвертого уровней западного, четвертого уровня южного и третьего и четвертого уровней северного профиля. Древостои первого высотного уровня восточного профиля, третьего уровня западного и первого уровня южного профиля с некоторыми допущениями можно отнести к категории абсолютно разновозрастных.

Формирование абсолютно разновозрастных древостоев в жестких лесорастительных условиях отмечалось многими исследователями (Комин, 1963; Мухамедшин, Шамшиев, 2005; Вернодубенко, 2011; и др.).

П.М. Верхунов и В.Л. Черных (2009) выделяют несколько направлений таксационной оценки разновозрастных насаждений:

-разновозрастный древостой рассматривается как единое целое с попыткой установления общих закономерностей в его строении и росте;

-разновозрастный древостой делится на ярусы, отдельные части по признаку спелости или на искусственные группы возраста с определенными интервалами;

-разновозрастный древостой рассматривается как совокупность естественных поколений леса;

-разновозрастный древостой сводится к трем поколениям древостоя и двум поколениям подроста.

Выделение в разновозрастном лесу естественных поколений способствует углубленному познанию особенностей лесообразовательного процесса, объективной оценке закономерностей роста и развития древостоев, обоснованию назначения и проведения тех или иных лесохозяйственных мероприятий.

Некоторые исследователи считают, что таксацию леса по поколениям следует осуществлять только при их морфологической выраженности, в противном случае необходимо проводить синтетическую оценку всего разновозрастного леса (Мухамедшин, Шамшиев, 2005; Верхунов, Черных, 2009; и др.).

В соответствии с ОСТ 56-108-98 поколение леса - это разновозрастная совокупность лесообразующих древесных растений участка леса, возраст которых может различаться в пределах не более двух классов возраста. В теории и практике лесоучетных работ разделение древостоя одной породы на поколения производится по группам возраста, установленным исходя из принятого для породы возраста рубки. Возрастные поколения, относящиеся к молоднякам, средневозрастным, приспевающим частям разновозрастного насаждения, выделяются при доле их участия в составе этого насаждения не менее 20% и (или) при разнице в средних диаметрах древостоев поколений не менее 6 сантиметров. Выделение возрастных поколений, относящихся к спелой и перестойной частям разновозрастного лесного насаждения, осуществляется в случаях, если доля их в общем запасе составляет не менее 20%. При

меньшей доле спелая и перестойная части разновозрастного лесного насаждения учитываются как единичные деревья (Лесоустроительная инструкция..., 2022).

В целом, на основе представленных выше материалов можно сделать следующее заключение. В верхней границе леса в насаждениях, характеризующихся циклично разновозрастным, ступенчато разновозрастным и абсолютно разновозрастным типами возрастной структуры, исследования особенностей лесообразовательного процесса, формирования, строения, роста и развития древостоев, необходимо проводить с выделением естественных поколений леса. Однако в данных насаждениях возрастные поколения морфологически не выражены, установить их в лесу визуально практически невозможно, объективно их можно выделить только при определении возраста значительного числа деревьев в камеральных условиях.

В частности, для определения среднего возраста древостоев на исследуемых объектах с точностью 10% при вероятности 0,68 (принятой в лесотаксационной практике) с учетом представленных в табл. 5.2 коэффициентов вариации необходимо провести от 7 (на четвертом высотном уровне западного профиля) до 32 (на втором уровне восточного профиля) случайных измерений возраста деревьев. Для того, чтобы определить средний возраст с точностью 5% при вероятности 0,68 количество измерений возраста на первом из указанных объектов должно составлять 27, а на втором – 129. Для достижения такой же точности (5 или 10%) с вероятностью 0,95 количество измерений возраста должно быть увеличено, соответственно, в два раза.

Среднее значение коэффициента вариации возраста деревьев в целом по экотону верхней границы леса (по всем высотным уровням заложенных профилей) составляет 42,3%. Таким образом, при синтетической оценке разновозрастных древостоев в целом по экотону для достижения 10% точности определения среднего возраста с вероятностью 0,68 необходимо в среднем произвести 18 случайных измерения возраста, а для достижения 5% точности с той же вероятностью – 72 измерения.

Такие результаты нами получены с использованием применяемой для нахождения необходимого числа измерений при случайной выборке формуле:

$$n = (V * t / P_o)^2, \quad (5.1)$$

где  $n$  – необходимое число измерений;

$V$  – коэффициент вариации исследуемого признака, %;

$t$  – критерий (принимается с округлением равным 1, 2 или 3, соответственно при вероятностях 0,68, 0,95 и 0,99);

$P_o$  – заданная точность результата, %.

В целом, с учетом крайне низких показателей роста (табл. 3.3) и не выраженности возрастных поколений леса в насаждениях, сформировавшихся в экотоне верхней границы леса, при их производственной таксации, на наш взгляд, целесообразна синтетическая оценка всего разновозрастного древостоя, но в пределах выделяемых высотных уровней.

Для оценки правомерности проведения такой таксации с применением общепризнанных методов в совокупностях крайне разновозрастных деревьев необходимо установить:

- проявляются ли (если да, то в какой степени) известные закономерности в строении древостоев элементов (поколений) леса в разновозрастных древостоях с несколькими поколениями леса;

- степень изменчивости основных таксационных показателей в данных древостоях;

- наличие, форму и тесноту взаимосвязей между таксационными показателями деревьев, слагающих разновозрастные древостои.

Данные вопросы рассматриваются в последующих разделах диссертации.

## **Выводы**

В целом, представленные выше материалы позволяют сделать следующие обобщения.

1. В исследуемом районе в ЭВГДР растущие в настоящее время деревья лиственницы резко отличаются по времени появления. Процесс лесовозобновления на

всех склонах очень растянут во времени, продолжительность его исчисляется столетиями. Устойчивое (без разрывов), достаточно активное возобновление лиственницы на первом уровне исследуемых профилей началось в 1950-1965 годах, а на втором – в 1940-1960 годах, то есть чуть раньше. На наш взгляд, это связано с существенным улучшением климатической обстановки в последние 70-80 лет.

2. Формирование абсолютно разновозрастных древостоев (с разницей в возрасте групп деревьев более чем на два класса возраста) в ЭВГДР объясняется складывающимися в верхних частях склонов условиями для лесовозобновления, которые не гарантируют участие даже появившихся всходов и самосева в лесовозобновительном процессе. Только после семенных годов при определенном (относительно благоприятном) сочетании факторов внешней среды возможны выживание и успешный рост всходов и подроста. В связи с этим процесс лесовозобновления в экотоне растягивается на долгие годы и формируются разновозрастные древостои. Таким образом, разновозрастность древостоев в верхней границе леса может рассматриваться как фактор их выживаемости и устойчивости в крайне неблагоприятных лесорастительных условиях.

3. Различия между высотными уровнями одного и того же профиля, а также одноименными уровнями разных профилей по густоте древостоев, скорости и характеру лесовозобновления, связаны с их локальными условиями местопроизрастания. И здесь определяющее значение могут иметь особенности снегонакопления и мощность снежного покрова на исследуемых объектах, которые определяют термический режим почв зимой и их увлажнение в вегетационный период, а также степень повреждения снежной абразией верхних частей растений, оказывающихся выше уровня снега.

4. На всех склонах диапазон изменения возраста лиственницы увеличивается с уменьшением абсолютной высоты расположения древостоев, а средние значения этого показателя уменьшаются по мере продвижения в гору: на западном профиле от 119 до 59 лет, на восточном – от 133 до 50, на северном – от 216 до 95 и на южном –

от 112 до 40 лет. Эти данные являются отражением постепенного поднятия верхней границы леса в последние столетия

5. На всех 15 исследованных объектах древостои лиственницы характеризуются высоким варьированием возраста деревьев. Причем, изменчивость возраста на восьми объектах соответствует очень высокому уровню (более 40%), на шести объектах – высокому (от 31 до 40%) и на одном объекте – повышенному уровню (от 21 до 30%). При прочих равных условиях коэффициенты изменчивости возраста деревьев в исследуемых древостоях существенно выше, чем приводимые в специальной литературе для отдельных элементов (поколений) леса.

6. По абсолютным значениям показателей асимметрии и эксцесса можно констатировать, что эмпирические ряды распределения деревьев по возрасту в подавляющем большинстве случаев существенно отличаются от нормального распределения Гаусса-Лапласа. При такой разновозрастности древостоев это вполне ожидаемый результат. Влияние высоты над уровнем моря на крутость и косость рядов не обнаруживается.

7. В соответствии с обобщенной схемой типов возрастной структуры древостоев Г.Е. Комина и И.В. Семечкина, в исследуемом ЭВГДР наибольшее распространение имеют циклично разновозрастные и ступенчато разновозрастные древостои, состоящие из нескольких морфологически невыраженных поколений леса.

С учетом крайне низких показателей роста и не выраженности возрастных поколений леса в насаждениях, сформировавшихся в ЭВГДР, при их таксации, целесообразна синтетическая оценка всего разновозрастного древостоя, но в пределах выделяемых высотных уровней.

## **Глава 6. Современное строение древостоев лиственницы по основным таксационным показателям**

В лесоводственно-таксационной науке понятие строения древостоев включает в себя изменчивость и распределение деревьев по различным таксационным показателям, а также взаимосвязи между ними.

### **6.1. Распределение деревьев лиственницы по таксационным показателям**

#### **6.1.1 Распределение деревьев лиственницы по диаметру**

Диаметр стволов является важнейшим показателем, с которым тесно связаны все основные таксационные характеристики деревьев и древостоев. Поэтому при исследовании строения древостоев главное внимание уделяется анализу рядов распределения деревьев по толщине. Этот ряд, характеризующий степень участия каждой ступени толщины в образовании древостоя, является основной таксационной характеристикой элементов (поколений леса), так как позволяет определить многие другие производные показатели.

Результаты статистической оценки рядов распределения количества деревьев лиственницы по диаметру в разрезе высотных уровней заложенных профилей приведены в таблице 6.1.

Приступая к анализу данных таблицы 6.1. можно отметить, что достоверность средних значений во всех случаях доказывается на 5%-ном уровне ( $t_{\text{факт.}} > t_{0,05}$ ). Точность опыта по отдельным объектам изменяется от 5,1 до 15,2%. Только на трех объектах из пятнадцати, ошибки среднего диаметра превышают 10%.

Приведенные в табл. 5.3 результаты статистического анализа данных определения диаметра деревьев позволяют констатировать следующее. На всех исследуемых профилях диапазон изменения диаметра стволов лиственницы и средние величины этого показателя закономерно увеличиваются с уменьшением абсолютной высоты расположения древостоев. Имеющиеся отклонения от этой закономерности, на наш взгляд, объясняются особенностями выборки.

Таблица 6.1 – Основные статистические характеристики распределения деревьев лиственницы по диаметру на различных высотных уровнях заложенных профилей

| Высотный уровень  | Минимальное значение, см | Максимальное значение, см | Среднее значение, см | Ошибка среднего, см | Показатель эксцесса | Показатель асимметрии | Коэффициент вариации, % | Точность опыта, % |
|-------------------|--------------------------|---------------------------|----------------------|---------------------|---------------------|-----------------------|-------------------------|-------------------|
| Западный профиль  |                          |                           |                      |                     |                     |                       |                         |                   |
| Первый            | 0,6                      | 14,0                      | 4,2                  | 0,38                | 0,73                | 1,03                  | 71,7                    | 9,1               |
| Второй            | 0,5                      | 20,0                      | 8,0                  | 1,22                | -1,18               | 0,42                  | 75,8                    | 15,2              |
| Третий            | 0,7                      | 29,0                      | 12,0                 | 0,61                | 0,21                | 0,32                  | 51,7                    | 5,1               |
| Четвертый         | 2,0                      | 31,0                      | 14,2                 | 0,73                | 0,11                | 0,66                  | 46,8                    | 5,1               |
| Восточный профиль |                          |                           |                      |                     |                     |                       |                         |                   |
| Первый            | 2,0                      | 10,0                      | 5,6                  | 0,47                | -0,64               | 0,43                  | 43,2                    | 8,3               |
| Второй            | 0,5                      | 23,0                      | 8,5                  | 0,83                | -0,42               | 0,69                  | 72,1                    | 9,8               |
| Третий            | 0,5                      | 30,0                      | 8,0                  | 0,76                | 1,28                | 1,20                  | 81,3                    | 9,5               |
| Четвертый         | 0,5                      | 36,0                      | 15,0                 | 0,96                | -0,96               | 0,20                  | 62,0                    | 6,4               |
| Северный профиль  |                          |                           |                      |                     |                     |                       |                         |                   |
| Первый            | -                        | -                         | -                    | -                   | -                   | -                     | -                       | -                 |
| Второй            | 0,8                      | 24,0                      | 8,8                  | 1,19                | -0,30               | 0,63                  | 75,1                    | 13,5              |
| Третий            | 0,7                      | 36,0                      | 11,4                 | 1,00                | 0,46                | 0,90                  | 74,0                    | 8,7               |
| Четвертый         | 8,5                      | 42,5                      | 23,3                 | 1,32                | -0,73               | 0,43                  | 39,2                    | 5,7               |
| Южный профиль     |                          |                           |                      |                     |                     |                       |                         |                   |
| Первый            | 1,0                      | 6,1                       | 3,6                  | 0,42                | -0,92               | 0,05                  | 45,7                    | 11,4              |
| Второй            | 0,5                      | 19,4                      | 6,2                  | 0,44                | 0,05                | 0,85                  | 69,6                    | 7,1               |
| Третий            | 1,0                      | 28,3                      | 11,2                 | 0,91                | -0,97               | 0,36                  | 67,8                    | 8,2               |
| Четвертый         | 1,2                      | 37,0                      | 15,0                 | 1,12                | -0,56               | 0,15                  | 58,0                    | 7,5               |

Наибольшим диапазоном варьирования диаметра деревьев (от 1,2 до 37,0 см) характеризуются лиственничники на четвертом уровне южного профиля, а наименьшим (от 1 до 6,1 см) – лиственничники первого уровня этого же профиля. Средние значения диаметра деревьев лиственницы на всех профилях уменьшаются по мере продвижения в гору: на западном профиле от 4,2 до 14,2 см, на восточном –

от 5,6 до 15,0, на северном – от 8,8 до 23,3 и на южном – от 3,6 до 15,0 см. Различия по среднему диаметру между древостоями 1 и 2 уровней, а также 2 и 4 уровней на всех профилях в высшей степени достоверны ( $t_{\text{факт.}} > t_{0,01}$ ). Различия между 2 и 3 уровням на западном и южном профилях достоверны, а на восточном и северном – нет. В целом, различия по среднему диаметру деревьев лиственницы между рединами (1 уровень) и редколесьями (2 уровень), а также между редколесьями и сомкнутыми лесами (4 уровень) более значительны, чем между редколесьями и древостоями у верхней границы сомкнутых лесов.

Показатель достоверности (существенности) различий устанавливался по формуле:

$$t = X_1 - X_2 / \sqrt{m_1 + m_2}, \quad (6.1)$$

где  $X_1$  и  $X_2$  – средние значения диаметра деревьев на соответствующих

высотных уровнях, см;

$m_1$  и  $m_2$  – ошибки среднего диаметра на соответствующих

высотных уровнях, см.

Закономерное уменьшение средних значений диаметра на всех профилях с повышением высоты над уровнем моря, как отмечалось выше, обусловлено снижением в этом направлении среднего возраста деревьев и ухудшением лесорастительных условий.

На основе анализа приведенных в таблице 6.1 значений коэффициента вариации диаметров можно отметить следующее. Лиственничники на исследуемых объектах характеризуются высокой изменчивостью диаметров стволов. Значения коэффициента вариации этого показателя изменяются в широком интервале от 39,2% (на четвертом высотном уровне северного профиля) до 81,3% (на третьем уровне восточного профиля). На западном и северном профилях варьирование диаметров стволов лиственницы закономерно увеличивается с повышением высоты над уровнем моря. На восточном и южном профилях изменчивость диаметра стволов на средних уровнях (втором и третьем) заметно выше, чем на верхнем (первом) и ниж-

нем (четвертом) уровнях. Видимо, это связано с локальными условиями произрастания лиственничников. В целом, коэффициент варьирования диаметра стволов на верхних уровнях исследуемых профилей изменяется от 43,2 до 75,1%, на средних (вторых и третьих) – от 51,7 до 81,3%, на нижних – от 39,2 до 62,0%.

По шкале С.А. Мамаева (1970) изменчивость диаметра стволов лиственницы на исследуемых объектах соответствует очень высокому уровню (более 40%). Исключение составляет лиственничник на нижнем уровне северного профиля, в котором коэффициент вариации диаметра деревьев равен 39,2%, соответствующий высокому уровню изменчивости признака.

Чрезвычайно высокая изменчивость диаметра стволов в исследуемых лиственничниках, на наш взгляд, в первую очередь связана их высокой разновозрастностью. Тенденция повышения варьирования диаметра деревьев с продвижением в гору можно объяснить заметным снижением возраста древостоев лиственницы и ухудшением лесорастительных условий в этом направлении. Общеизвестно, что изменчивость толщины стволов тем выше, чем моложе древостои и жестче экологические условия (Луганский, Нагимов, 1994; Гусев, 1997; и др.).

Высокая изменчивость диаметра деревьев в экотонах верхней границы леса отмечают и другими исследователями. Так, в высокогорных условиях в лиственничниках Приполярного Урала этот показатель изменяется от 50 до 55%, в лиственничниках Среднего Урала – от 39 до 60%, а в ельниках Южного Урала – от 26 до 67% (Бабенко, 2006; Бартыш, 2008; Григорьев, 2011).

Несомненный интерес представляет сравнение наших результатов (в экстремальных условиях произрастания лесов) с соответствующими материалами других авторов, полученными в условиях равнинных лесов. По данным многих исследователей изменчивость диаметров деревьев в древостоях зависит от многих факторов: породы, возраста и возрастной структуры древостоев, лесорастительных условий и др. При таксации *по элементам леса* в светлохвойных насаждениях в молодняках она составляет 40-60%, а в спелых и перестойных древостоях – 22–27% (Верхунов,

1975; Загребев и др., 1992; Луганский, Нагимов, 1994; Верхунов, Черных, 2009; и др.). Сопоставление наших данных, полученных *при синтетической оценке* всего разновозрастного древостоя, с литературными (полученными для элементов леса) при примерно одинаковом возрасте древостоев показывает, что в исследуемых лиственничниках изменчивость диаметров стволов существенно выше (на некоторых уровнях на 20% и более), чем в светлохвойных насаждениях Европейской части страны, Среднего Урала и Сибири.

Показатель асимметрии рядов распределения числа деревьев по диаметру во всех случаях имеет положительный знак и изменяется от 0,05 (первый уровень южного профиля) до 1,20 (третий уровень восточного профиля). В большинстве случаев значение этого показателя достоверны на 5% уровне, то есть экспериментальные кривые по косости не подчиняются нормальному закону, характеризуясь резко выраженной положительной асимметрией.

Показатель эксцесса исследуемых рядов имеет разные знаки и изменяется от -1,18 (второй уровень западного профиля) до 1,28 (третий уровень восточного профиля). Абсолютные значения этого показателя свидетельствуют о том, что по крутости большинство эмпирических кривых распределения диаметров существенно отличаются от нормальной кривой Гаусса-Лапласа.

Данные табл. 5.2 и 5.3 позволяют оценить средний общий прирост по диаметру в целом для древостоев лиственницы в разрезе высотных уровней исследуемых профилей. Этот прирост определяется делением величины таксационного показателя дерева на его возраст, то есть показывает увеличение таксационного показателя в среднем за один год всей жизни дерева.

Результаты соответствующих расчетов позволили отметить следующее. Средний общий прирост по диаметру на западном профиле изменяется от 0,71 мм (на первом уровне) до 0,89 мм (на четвертом уровне), на восточном профиле – от 0,93 мм (на втором уровне) до 1,13 мм (на четвертом уровне), на северном профиле – от

0,93 мм (на втором уровне) до 1,27 мм (на третьем уровне) и на южном профиле – от 0,90 мм (на первом уровне) до 1,34 мм (на четвертом уровне). В целом исследуемые лиственничники характеризуются крайне низкими значениями данного показателя. Причем проявляется достаточно устойчивое увеличение среднего прироста по диаметру по мере снижения высотного положения древостоев, несмотря на увеличение в этом направлении их среднего возраста. Известно, что после 50-60-летнего возраста средний общий прирост по диаметру в сомкнутых лиственничниках V и Va классов бонитета закономерно уменьшается (Загреев и др., 1992). Увеличение данного показателя по мере снижения высоты над уровнем моря наиболее отчетливо выражено на южном профиле, на котором величина прироста на первом уровне (0,90 мм) на 32,8% меньше, чем на четвертом (1,34 мм). Закономерное увеличение среднего общего прироста с уменьшением высотного положения древостоев в первую очередь объясняется более благоприятными лесорастительными условиями на нижних высотных уровнях по сравнению с верхними.

Определенное влияние на величину среднего общего прироста по диаметру оказывает экспозиция склона. Наибольшим значением данного показателя характеризуется южный профиль, на котором оно с средним для всех уровней составляет 1,14 мм, а наименьшим – западный профиль (0,80 мм). Остальные два профиля по этому показателю занимают промежуточное положение. Превосходство южного профиля над остальными по величине среднего общего прироста по диаметру объясняется более благоприятными микроклиматическими условиями и сравнительно низким возрастом древостоев на данном профиле.

При синтетической оценке всего разновозрастного древостоя в практическом отношении несомненный интерес представляют данные о необходимом числе измерений диаметров деревьев для достижения определенной точности определения среднего значения данного показателя. С учетом представленных в табл. 6.1 коэффициентов вариации по формуле (5.1) для определения среднего диаметра лиственницы на исследуемых объектах с точностью 10% при вероятности 0,68 необходимо

провести от 15 (на четвертом высотном уровне северного профиля) до 66 (на третьем уровне восточного профиля) измерений диаметра деревьев. Для того, чтобы определить средний диаметр с точностью 5% при вероятности 0,68 количество измерений диаметра на первом из указанных объектов должно составлять 61, а на втором – 264. Для достижения такой же точности (5 или 10%) с вероятностью 0,95 количество измерений диаметра должно быть увеличено, соответственно, в два раза.

Среднее значение коэффициента вариации диаметра деревьев в целом по экотону верхней границы леса (по всем высотным уровням заложенных профилей) составляет 62,3%. Таким образом, при синтетической оценке разновозрастных древостоев в целом по экотону для достижения 10% точности определения среднего диаметра с вероятностью 0,68 необходимо в среднем произвести 39 случайных измерений диаметра, а для достижения 5% точности с той же вероятностью – 155 измерений.

### **6.1.2. Распределение деревьев лиственницы по высоте**

В специальной литературе отмечается, что изменчивость высот деревьев в отдельно взятом ярусе (элементе леса) значительно ниже изменчивости их диаметров. Коэффициент вариации высот, как правило, не превышает 10-15% (Вагин и др., 1978; Анучин, 1982; и др.). При такой изменчивости среднюю высоту при производственной таксации определяют по высотам 3-5 средних по размерам деревьев (Лесоустроительная инструкция..., 2022). Сведений об изменчивости высот и рекомендаций по определению среднего значения данного показателя при синтетической оценке разновозрастного древостоя в специальной литературе крайне мало.

Результаты статистической оценки рядов распределения количества деревьев лиственницы по высоте в разрезе высотных уровней заложенных профилей приведены в табл. 6.2.

Таблица 6.2 – Основные статистические характеристики распределения деревьев лиственницы по высоте на различных высотных уровнях заложенных профилей

| Высотный уровень  | Минимальное значение, м | Максимальное значение, м | Среднее значение, м | Ошибка среднего, м | Показатель эксцесса | Показатель асимметрии | Коэффициент вариации, % | Точность опыта, % |
|-------------------|-------------------------|--------------------------|---------------------|--------------------|---------------------|-----------------------|-------------------------|-------------------|
| Западный профиль  |                         |                          |                     |                    |                     |                       |                         |                   |
| Первый            | 1,6                     | 11,0                     | 3,91                | 0,29               | 1,17                | 1,32                  | 58,4                    | 7,4               |
| Второй            | 1,7                     | 17,5                     | 6,35                | 0,84               | 0,38                | 0,89                  | 65,9                    | 13,2              |
| Третий            | 1,5                     | 19,0                     | 7,61                | 0,37               | -0,02               | 0,42                  | 48,5                    | 4,8               |
| Четвертый         | 2,3                     | 15,5                     | 8,42                | 0,36               | -0,34               | 0,41                  | 37,6                    | 4,3               |
| Восточный профиль |                         |                          |                     |                    |                     |                       |                         |                   |
| Первый            | 1,7                     | 6,6                      | 3,98                | 0,30               | -1,24               | 0,17                  | 39,9                    | 7,5               |
| Второй            | 1,6                     | 14,0                     | 5,94                | 0,42               | -0,17               | 0,63                  | 52,1                    | 7,0               |
| Третий            | 1,5                     | 14,0                     | 5,30                | 0,37               | -0,18               | 0,92                  | 65,8                    | 7,1               |
| Четвертый         | 1,7                     | 21,0                     | 8,85                | 0,48               | -0,52               | 0,34                  | 52,6                    | 5,4               |
| Северный профиль  |                         |                          |                     |                    |                     |                       |                         |                   |
| Первый            | -                       | -                        | -                   | -                  | -                   | -                     | -                       | -                 |
| Второй            | 1,7                     | 8,5                      | 4,12                | 0,34               | -0,44               | 0,70                  | 46,5                    | 8,4               |
| Третий            | 1,5                     | 14,5                     | 6,85                | 0,39               | -0,59               | 0,45                  | 48,7                    | 5,7               |
| Четвертый         | 5,4                     | 20,8                     | 12,41               | 0,50               | -0,03               | 0,15                  | 28,1                    | 4,1               |
| Южный профиль     |                         |                          |                     |                    |                     |                       |                         |                   |
| Первый            | 1,5                     | 3,6                      | 2,64                | 0,16               | -1,25               | 0,02                  | 24,9                    | 5,9               |
| Второй            | 1,5                     | 10,0                     | 4,33                | 0,19               | -0,04               | 0,65                  | 42,7                    | 4,3               |
| Третий            | 1,5                     | 12,5                     | 6,53                | 0,42               | -1,45               | 0,10                  | 54,1                    | 6,4               |
| Четвертый         | 1,5                     | 19,5                     | 7,79                | 0,54               | -0,06               | 0,53                  | 56,1                    | 7,0               |

Анализ статистик распределения высот позволяет отметить следующее. Достоверность средних значений на всех объектах доказывается на 5%-ном уровне ( $t_{\text{факт.}} > t_{0,05}$ ). Точность опыта по отдельным высотным уровням изменяется от 4,1 до 13,2%. Только на одном объекте из пятнадцати она превышает 10%.

На всех исследуемых профилях диапазон изменения высоты деревьев лиственницы и средние величины этого показателя закономерно увеличиваются с уменьшением абсолютной высоты произрастания древостоев относительно уровня моря. Редкие отклонения от этой закономерности, на наш взгляд, как и в случаях с возрастом

и диаметром деревьев, объясняются особенностями выборки. Наибольшим диапазоном варьирования высоты деревьев (от 1,7 до 21,0 м) характеризуются лиственничники на четвертом уровне восточного профиля, а наименьшим (от 1,5 до 3,6 м) – лиственничники первого уровня южного профиля.

На всех исследуемых профилях диапазон изменения высоты деревьев лиственницы и средние величины этого показателя закономерно увеличиваются с уменьшением абсолютной высоты произрастания древостоев относительно уровня моря. Редкие отклонения от этой закономерности, на наш взгляд, как и в случаях с возрастом и диаметром деревьев, объясняются особенностями выборки. Наибольшим диапазоном варьирования высоты деревьев (от 1,7 до 21,0 м) характеризуются лиственничники на четвертом уровне восточного профиля, а наименьшим (от 1,5 до 3,6 м) – лиственничники первого уровня южного профиля.

Средние значения высоты деревьев лиственницы на всех профилях уменьшаются по мере продвижения в гору: на западном профиле от 3,91 до 8,42 м, на восточном – от 3,98 до 8,85, на северном – от 4,12 до 12,41 и на южном – от 2,64 до 7,79 м. Закономерное уменьшение средних значений высоты на всех профилях с повышением высоты над уровнем моря, как и в случае с диаметром, обусловлено снижением в этом направлении среднего возраста деревьев и ухудшением лесорастительных условий. Некоторое несоответствие этой закономерности данных на восточном профиле, видимо, также связано с особенностями выборки. Различия по средней высоте между древостоями 1 и 2 уровней, а также 2 и 4 уровней на всех профилях в высшей степени достоверны ( $t_{\text{факт.}} > t_{0,01}$ ). Различия между 2 и 3 уровням на западном и восточном профилях достоверны, а на южном и северном – нет. В целом, различия по средней высоте деревьев лиственницы между рединами и редколесьями, а также между редколесьями и сомкнутыми лесами более значительны, чем между редколесьями и древостоями у верхней границы сомкнутых лесов.

Лиственничники на исследуемых объектах характеризуются высокой изменчивостью высоты деревьев. Значения коэффициента вариации этого показателя изме-

няются в широком интервале от 24,9% (на первом высотном уровне южного профиля) до 65,8% (на третьем уровне восточного профиля). Устойчивой закономерности в изменении изменчивости высот, связанной с высотным положением древостоев, на исследуемом полигоне не наблюдается. С повышением высоты над уровнем моря варьирование высоты стволов лиственницы на западном профиле увеличивается, на южном - уменьшается, а на восточном и северном - максимальных значений достигает на средних уровнях (втором и третьем). В целом, коэффициент варьирования высоты стволов на верхних уровнях исследуемых профилей изменяется от 24,9 до 58,4%, на средних (вторых и третьих) – от 42,7 до 65,8%, на нижних – от 28,1 до 56,1%. Приведенные материалы свидетельствуют, что степень дифференциации деревьев по высоте на исследуемых объектах существенно ниже, чем по диаметру. Это известный в лесной таксации факт и не требует дополнительных пояснений.

Результаты сопоставления наших материалов с данными шкалы С.А. Мамаева (1970) свидетельствуют, что на 11 объектах (из 15) изменчивость высоты стволов лиственницы соответствует очень высокому уровню (более 40%), на 2 – высокому (от 31 до 40%) и на 2 – повышенному (от 21 до 30%). Чрезвычайно высокая изменчивость высоты стволов в исследуемых лиственничниках по сравнению с приведенными выше литературными данными, на наш взгляд, в первую очередь связана с их высокой разновозрастностью деревьев.

В научной лесоводственно-таксационной литературе общепризнанным и неоспоримым является положение о заметном уменьшении с повышением возраста древостоев варьирования не только диаметров, но и высот деревьев. Указывается, что коэффициент вариации высоты деревьев составляет в молодняках светлохвойных пород в среднем 20-30%, а в спелых насаждениях – 5–15% (Загребов и др., 1992; Верхунов, Черных, 2009; и др.). Сопоставление наших данных, полученных при синтетической оценке всего разновозрастного древостоя, с литературными (полученными для элементов леса) при примерно одинаковом возрасте древостоев показывает, что в исследуемых лиственничниках изменчивость высоты стволов существенно

выше (на некоторых уровнях на 20% и более), чем в светлохвойных насаждениях Европейской части страны, Среднего Урала и Сибири.

Коэффициент асимметрии рядов распределения числа деревьев лиственницы по высоте изменяется от 0,02 до 1,32, то есть на всех объектах имеет положительный знак. В подавляющем большинстве случаев значение этого показателя достоверны на 5% уровне. Это свидетельствует, что экспериментальные кривые по косости существенно отличаются от кривой нормального распределения, имея резко выраженную положительную асимметрию.

Коэффициент эксцесса анализируемых рядов изменяется в диапазоне от -1,45 до 1,17 и в большинстве случаев (в 14 рядах из 15) характеризуется отрицательными значениями, то есть ряды распределения высот в исследуемых лиственничниках плосковершинны.

В целом, значения показателей асимметрии и эксцесса дают основание считать, что эмпирические распределения высот на исследуемых объектах не могут описываться нормальной кривой.

Исследуемые лиственничники характеризуются крайне низкими значениями среднего общего прироста по высоте. Этот показатель на западном профиле изменяется от 4,9 см (на третьем уровне) до 6,6 см (на первом уровне), на восточном профиле – от 6,5 см (на втором уровне) до 8,0 см (на первом уровне), на северном профиле – от 4,3 см (на втором уровне) до 7,6 см (на третьем уровне) и на южном профиле – от 6,6 см (на первом уровне) до 8,3 см (на втором уровне). На всех профилях одностороннего влияния высоты над уровнем моря на величину среднего общего прироста по высоте не наблюдается. Наибольшим значением данного показателя характеризуются южный и восточный профили. На первом из них этот прирост в среднем для всех уровней составляет 7,3 см, а втором – 7,2 см. На западном и северном профилях величина среднего общего прироста по высоте заметно ниже (5,8 и 5,9 см, соответственно).

Превосходство южного и восточного профилей над северным и западным по величине среднего общего прироста по высоте объясняется более благоприятными микроклиматическими условиями и сравнительно низким возрастом древостоев на первых двух профилях.

Необходимая точность при определении средней высоты лиственничников обеспечивается при меньшем объеме выборки, чем при определении их среднего диаметра. Исходя из представленных в табл. 6.2 коэффициентов вариации для определения средней высоты лиственницы на исследуемых объектах с точностью 10% при вероятности 0,68 необходимо провести от 6 (на первом высотном уровне южного профиля) до 43 (на третьем уровне восточного профиля) измерений высоты деревьев. Для того, чтобы определить среднюю высоту с точностью 5% при этой же вероятности количество измерений высоты на первом из указанных объектов должно составлять 25, а на втором – 173. Для достижения такой же точности (5 или 10%) с вероятностью 0,95 количество измерений высоты должно быть увеличено, соответственно, в два раза.

Среднее значение коэффициента вариации высоты деревьев в целом по экотону верхней границы леса (по всем высотным уровням заложенных профилей) составляет 48,1%. Таким образом, при синтетической оценке разновозрастных древостоев в целом по экотону для достижения 10% точности определения средней высоты с вероятностью 0,68 необходимо в среднем произвести 23 случайных измерений высоты, а для достижения 5% точности с той же вероятностью – 93 измерений.

## **6.2. Взаимосвязи таксационных показателей деревьев**

При оценке таксационного строения древостоев важной составляющей, помимо выявления особенностей распределения деревьев по тем или иным признакам, является установление наличия, формы и тесноты взаимозависимостей между размерами стволов и крон. Древостои экотона верхней границы леса в этом отношении остаются малоизученными. В нашей работе результаты таких исследований важны и

для оценки правомерности применения в разновозрастных древостоях с несколькими поколениями леса методов, применяемых в настоящее время при таксации насаждений по элементам или поколениям леса.

### **6.2.1. Взаимосвязь диаметра и высоты деревьев**

Взаимосвязь диаметра и высоты деревьев относится к наиболее используемым в настоящее время при таксации лесов. В специальной литературе имеются сведения, что до определенного возраста корреляционная связь между данными показателями деревьев передается прямолинейной зависимостью. Причем прямолинейный характер этой зависимости у разных древесных пород сохраняется до различного возраста. Однако, как отмечают некоторые исследователи, появление криволинейной зависимости (изменение соотношений между диаметром и высотой) в основном обусловлено не возрастом древостоя, а уровнем конкуренции между деревьями. При конкуренции темпы роста деревьев по высоте более значительны, чем по диаметру (Юкнис, 1983; Третьякова, 2006; Бабенко, 2006; Григорьев, 2011; и др.). Р.А. Юкнис (1983) указывает, что у одиночно растущих деревьев наблюдается изометрия роста и соотношение диаметра и высоты остается постоянным.

Для оценки характера связи между диаметром и высотой стволов лиственницы по каждому высотному уровню заложенных профилей были построены графики зависимости между данными характеристиками и испытаны различные функции для их корректного описания (рис. 6.1– 6.4).

Результаты настоящих исследований свидетельствуют, что на всех высотных уровнях заложенных профилей между диаметрами и высотами стволов деревьев лиственницы наблюдаются достаточно устойчивые и тесные связи. Значения коэффициента детерминации парных связей колеблется в диапазоне от 0,624 (на третьем уровне западного профиля) до 0,931 (на третьем уровне восточного профиля). В целом, можно отметить, что разработанные уравнения адекватны экспериментальным данным и корректно передают характер исследуемых зависимостей.

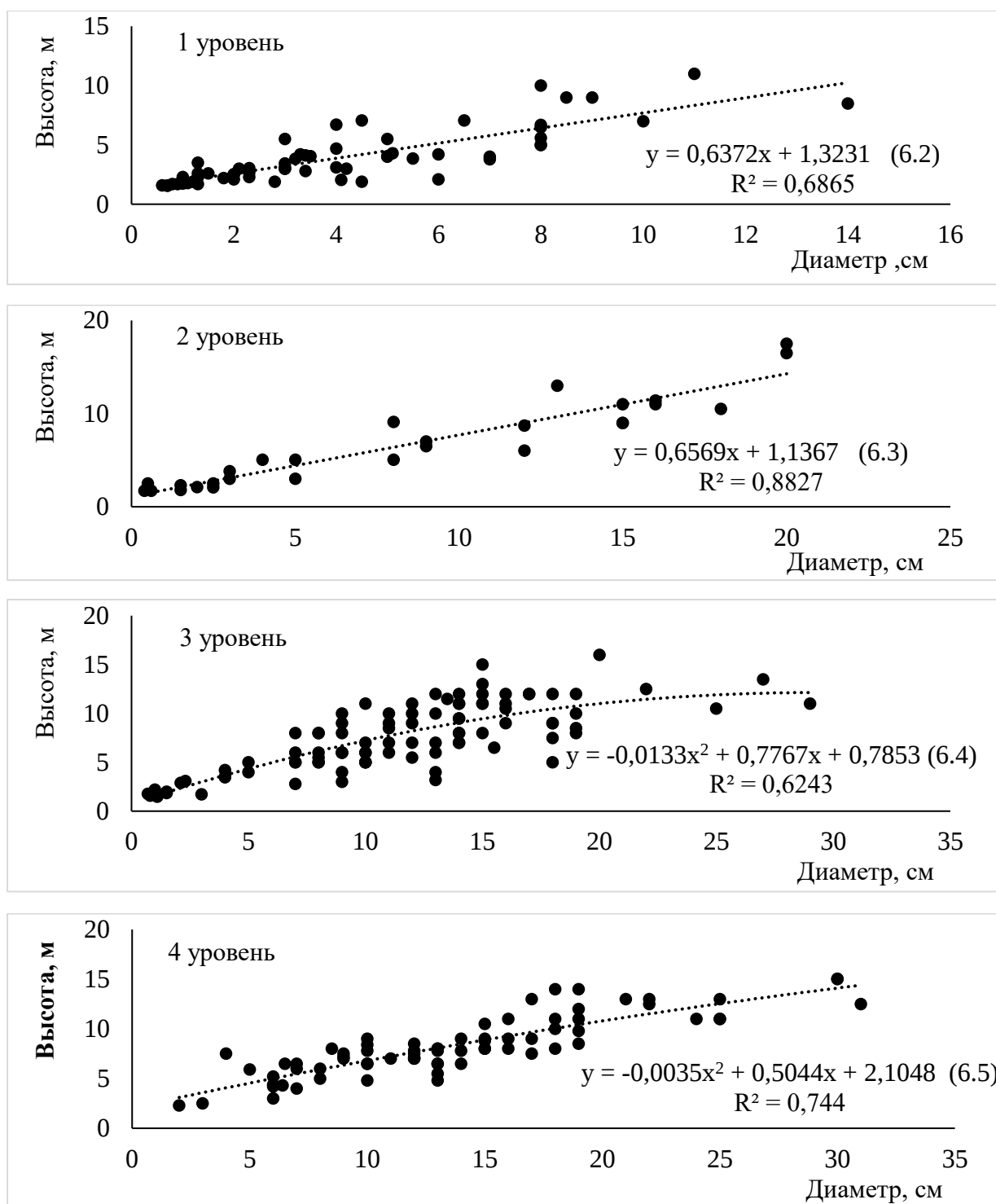


Рисунок 6.1 – Зависимость высоты деревьев от их диаметра на разных высотных уровнях западного профиля

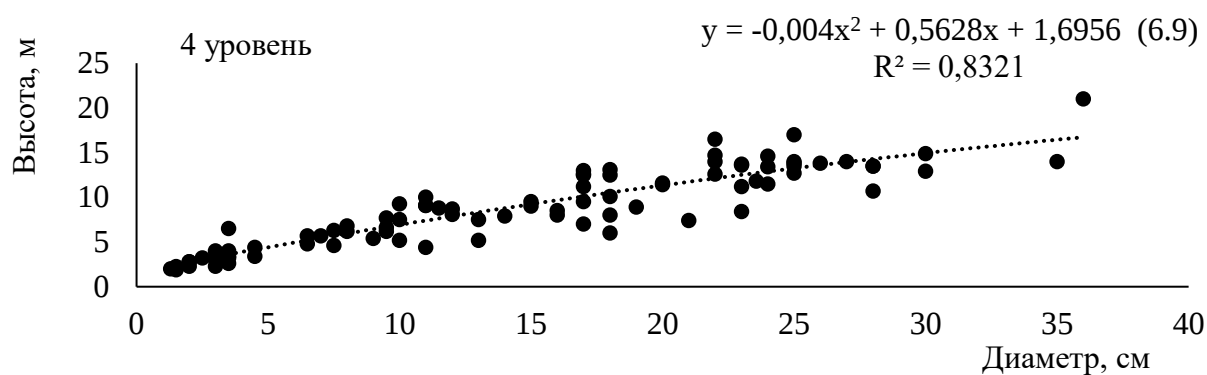
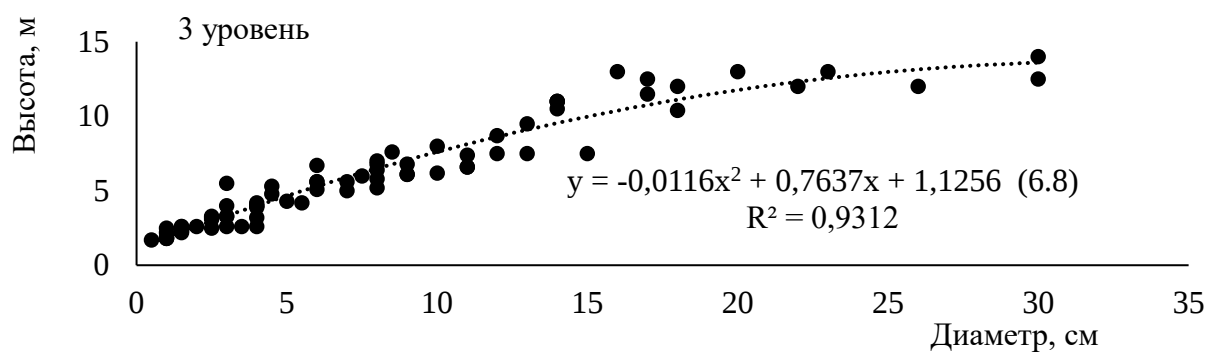
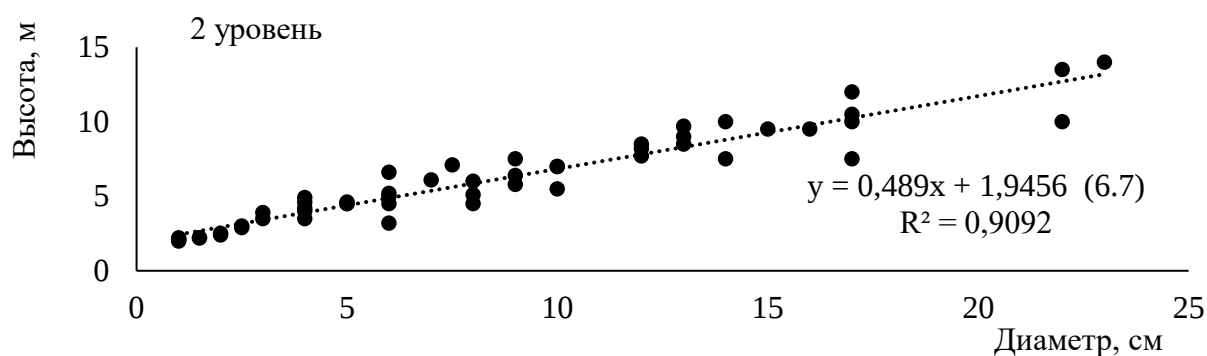
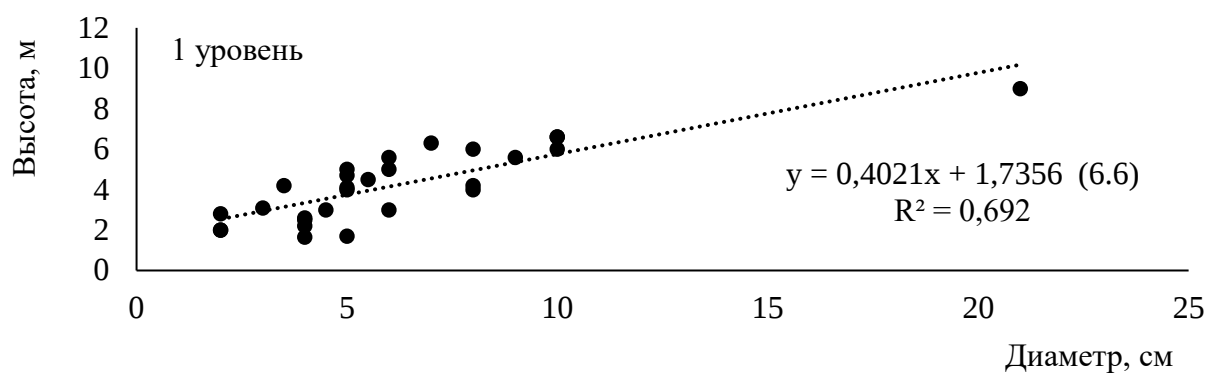


Рисунок 6.2 – Зависимость высоты деревьев от их диаметра на разных высотных уровнях восточного профиля

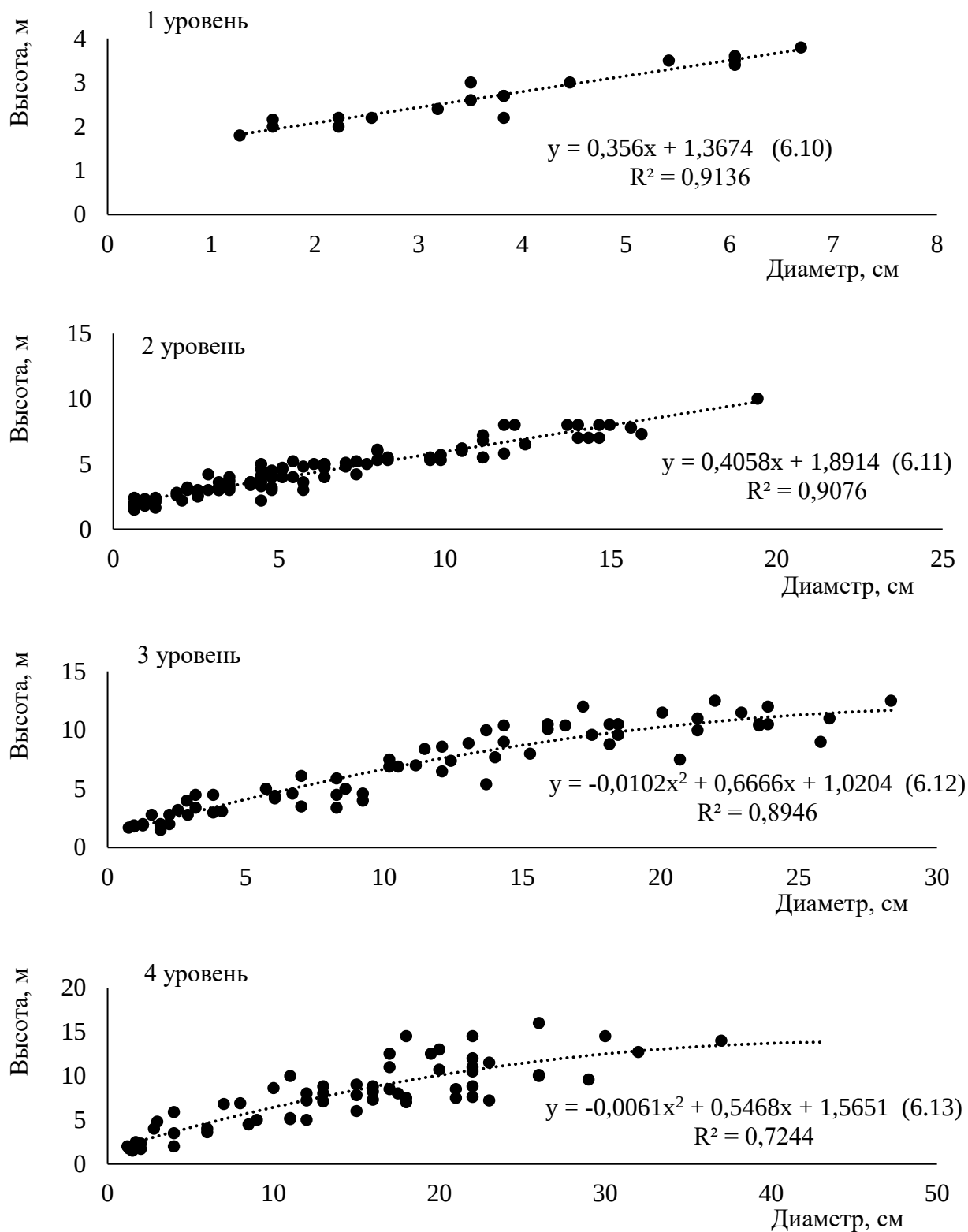


Рисунок 6.3 – Зависимость высоты деревьев от их диаметра на разных высотных уровнях южного профиля

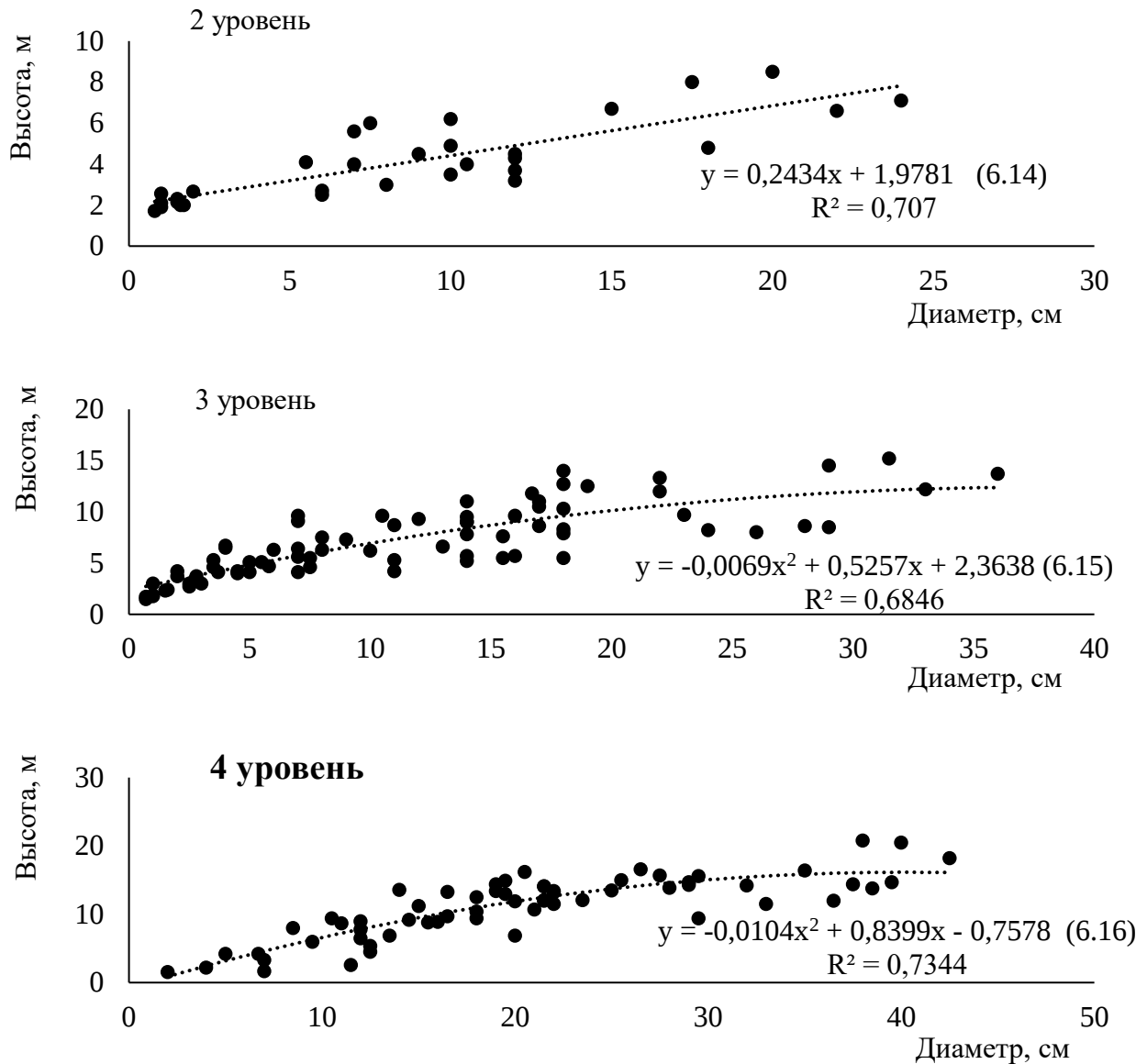


Рисунок 6.4 – Зависимость высоты деревьев от их диаметра на разных высотных уровнях северного профиля

Анализ графических данных, приведенных на рис. 6.1–6.4, позволяет отметить следующее. На первом и втором высотных уровнях всех заложенных профилей связь между диаметром и высотой деревьев выражается прямой линией (соотношение данных показателей – величина постоянная). В контексте выводов указанных выше исследователей (Юкнис, 1983; Третьякова, 2006; Бабенко, 2006; Григорьев, 2011) прямолинейная пропорциональность свидетельствует об отсутствии на данных

уровнях конкуренции между деревьями. Это вполне логично. Лиственничники на данных участках характеризуются незначительной густотой и сомкнутостью крон (табл. 3.3.), деревья растут практически в изолированном состоянии.

На третьем и четвертом уровнях высотных профилей наблюдается нарушение постоянства в соотношении диаметра и высоты деревьев – зависимость между этими показателями имеет криволинейный характер. Видимо, это связано с тем, что на этих высотных уровнях возрастает густота и сомкнутость крон древостоев, а, следовательно, и конкурентные взаимоотношения между деревьями. Полученные результаты согласуются с материалами других исследователей. О трансформации прямолинейной зависимости между диаметрами и высотами деревьев в криволинейную в древостоях экотона верхней границы леса по мере снижения высоты над уровнем моря ранее отмечалось в работах Т.С. Бабенко (2006), А.А. Бартыша (2008) и А.А. Григорьева (2011).

При нелинейных связях не существует процедуры однозначного выбора их аналитического выражения – одна и та же зависимость может быть описана различными функциями (Никитин, Швиденко, 1978). Большинство исследователей в таких случаях в качестве наилучшей выбирают функцию, в большей степени соответствующую экспериментальным данным. Из множества уравнений, используемых разными авторами для описания зависимости высот деревьев от их диаметров, наиболее корректное соответствие эмпирическим данным на третьем и четвертом уровнях всех профилей показали уравнения кривых (полиномы) второго и третьего порядков со свободным членом. Следует отметить, что эти уравнения при аппроксимации экспериментальных материалов обеспечивают примерно одинаковые результаты. В то же время в специальной литературе есть мнение, что математические функции с большим количеством постоянных не выражают закономерностей изменений показателей, а описывают случайности результатов измерений. Поэтому в нашей работе при описании зависимости высот деревьев от их диаметров предпочтение отдано кривой второго порядка. Коэффициенты детерминации при разработанных уравнениях сви-

детельствуют, что уравнения вполне адекватны экспериментальным данным и могут успешно использоваться при лесоучетных работах.

Графические данные и разработанные уравнения позволяют констатировать, что высота над уровнем моря оказывает определенное влияние и на количественные соотношения диаметров и высот деревьев. Выявляется тенденция увеличения высоты у деревьев одинаковой толщины по мере снижения высоты произрастания древостоев относительно уровня моря. Например, на первом уровне южного профиля высота лиственниц диаметром 10 см составляет 4,93 м, на втором – 5,95, на третьем – 6,67 и на четвертом – 6,43 м. Таким образом, по мере продвижения вверх по склону ухудшаются условия для роста лиственницы в высоту и меняется разряд высоты древостоев. К аналогичному выводу приходили также другие исследователи верхней границы леса (Бабенко, 2006; Бартыш, 2008; Григорьев, 2011; и др.).

При фиксированных высотных уровнях выявляется определенное влияние на высоту деревьев одинаковой толщины экспозиции склонов. Это влияние особенно значительно на первом и втором высотном уровнях. По этим уровням по уменьшению высоты деревьев одинаковой толщины склоны располагаются в следующий ряд: западный, восточный, южный и северный. Так, высота деревьев толщиной 10 см, произрастающих на вторых высотных уровнях, в среднем составляет: на западном склоне – 7,71 м, восточном – 6,84, южном – 5,95 и северном – 4,41 м.

В целом, приведенные материалы свидетельствуют, что в экотоне верхней границы леса, с изменением экспозиции склонов и высоты над уровнем моря заметно меняется соотношение между диаметрами и высотами деревьев и разряд высоты древостоев.

### **6.2.2. Взаимосвязь диаметра крон с диаметром стволов**

Состояние и интенсивность роста деревьев тесно связаны с линейными размерами крон. Как отмечает В.В. Кузьмичев (1977) ценотические условия в древостоях в первую очередь сказываются на росте и развитии крон, и только потом - на разме-

рах стволов, которые являются результатом физиологических процессов, происходящих в пологе древостоев. Поэтому при оценке дифференциации деревьев по размерам, внутривидовых и межвидовых взаимоотношений, а также при проведении лесоучетных работ важное значение имеет определение размеров крон и изучение взаимосвязей между таксационными показателями стволов и крон.

В специальной литературе отмечается, что в сомкнутых древостоях между линейными размерами кроны (диаметром и протяженностью) и ствола (диаметром и высотой) наблюдаются тесные связи (Неволин, 1967; Кузьмичев, 1977; Горячев, 1987; Луганский, Нагимов, 1994; Третьякова, 2006; и др.). Они находят широкое применение при лесооценочных работах, в частности, при дистанционных способах таксации лесов (Сухих, 2005). Выявлено, что соотношения между линейными размерами стволов и крон в процессе онтогенеза меняются в широком диапазоне в зависимости от условий роста деревьев. Одним из основных факторов, оказывающих влияние на указанное соотношение, является полнота древостоев (Юкнис, 1983; и др.).

Значительный интерес в наших исследованиях представляет выявление зависимостей между диаметрами крон и стволов в древостоях разных высотных уровней, существенно различающихся по сомкнутости полога и относительной полноте.

Результаты их, безусловно, будут полезны при организации дистанционного изучения древостоев верхней границы леса.

Для оценки характера связи между диаметрами стволов и крон лиственницы по каждому высотному уровню заложенных профилей были построены графики зависимости между данными характеристиками и испытаны различные функции для их описания (рисунки 6.5 – 6.8).

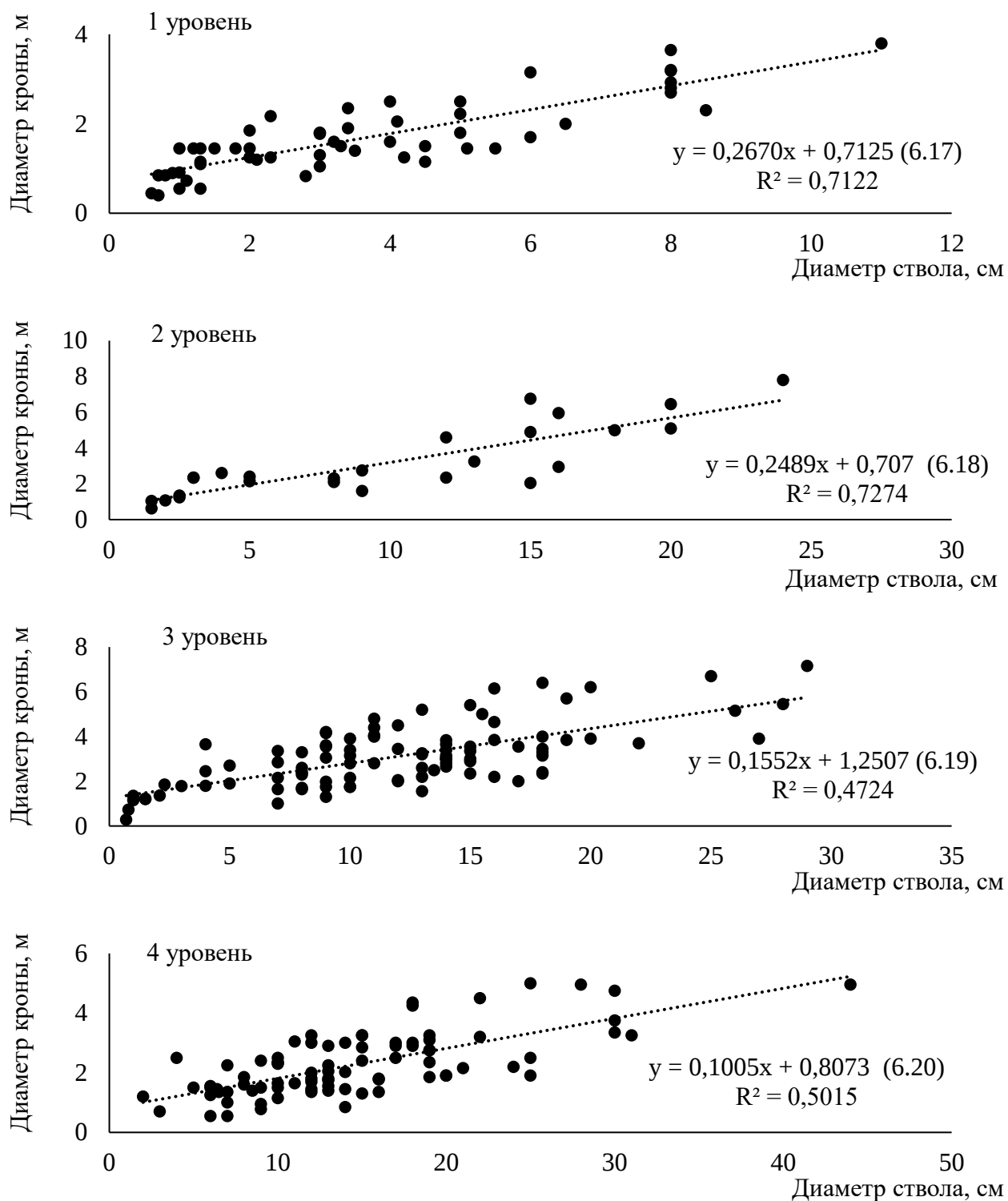


Рисунок 6.5 – Зависимость диаметра кроны от диаметра стволов у деревьев лиственницы на разных высотных уровнях западного профиля

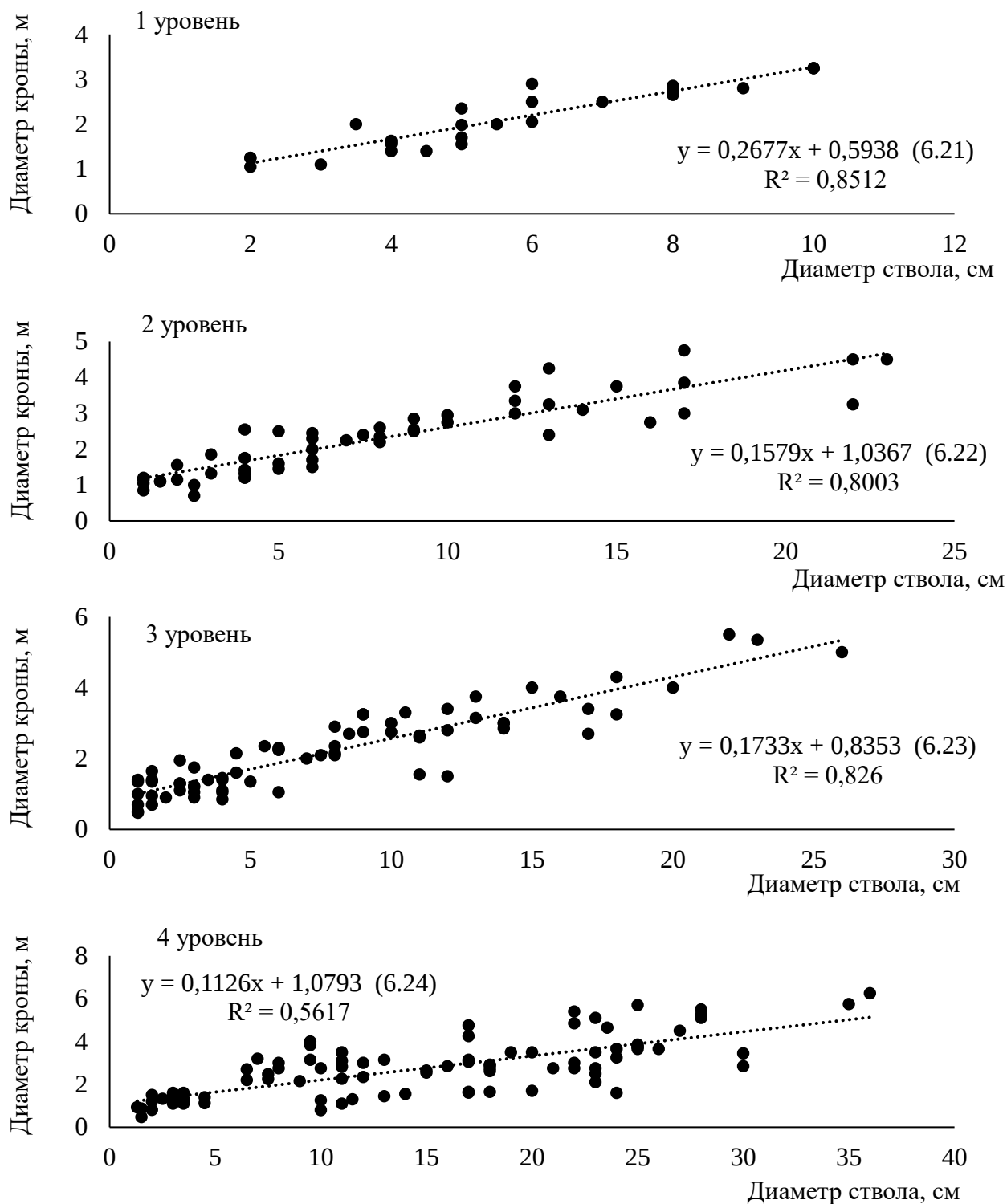


Рисунок 6.6 – Зависимость диаметра кроны от диаметра стволов у деревьев лиственницы на разных высотных уровнях восточного профиля

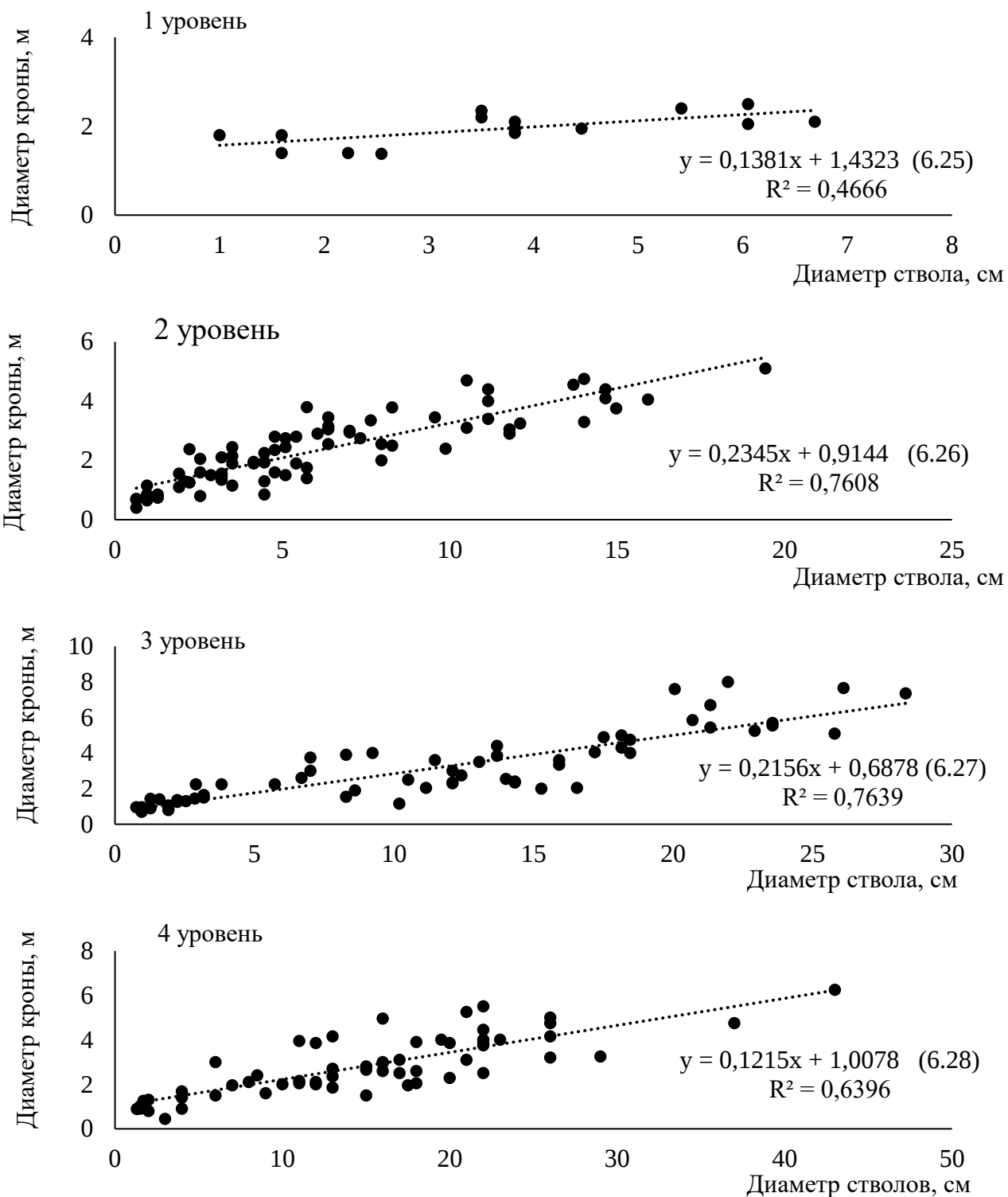


Рисунок 6.7 – Зависимость диаметра кроны от диаметра стволов у деревьев лиственницы на разных высотных уровнях южного профиля

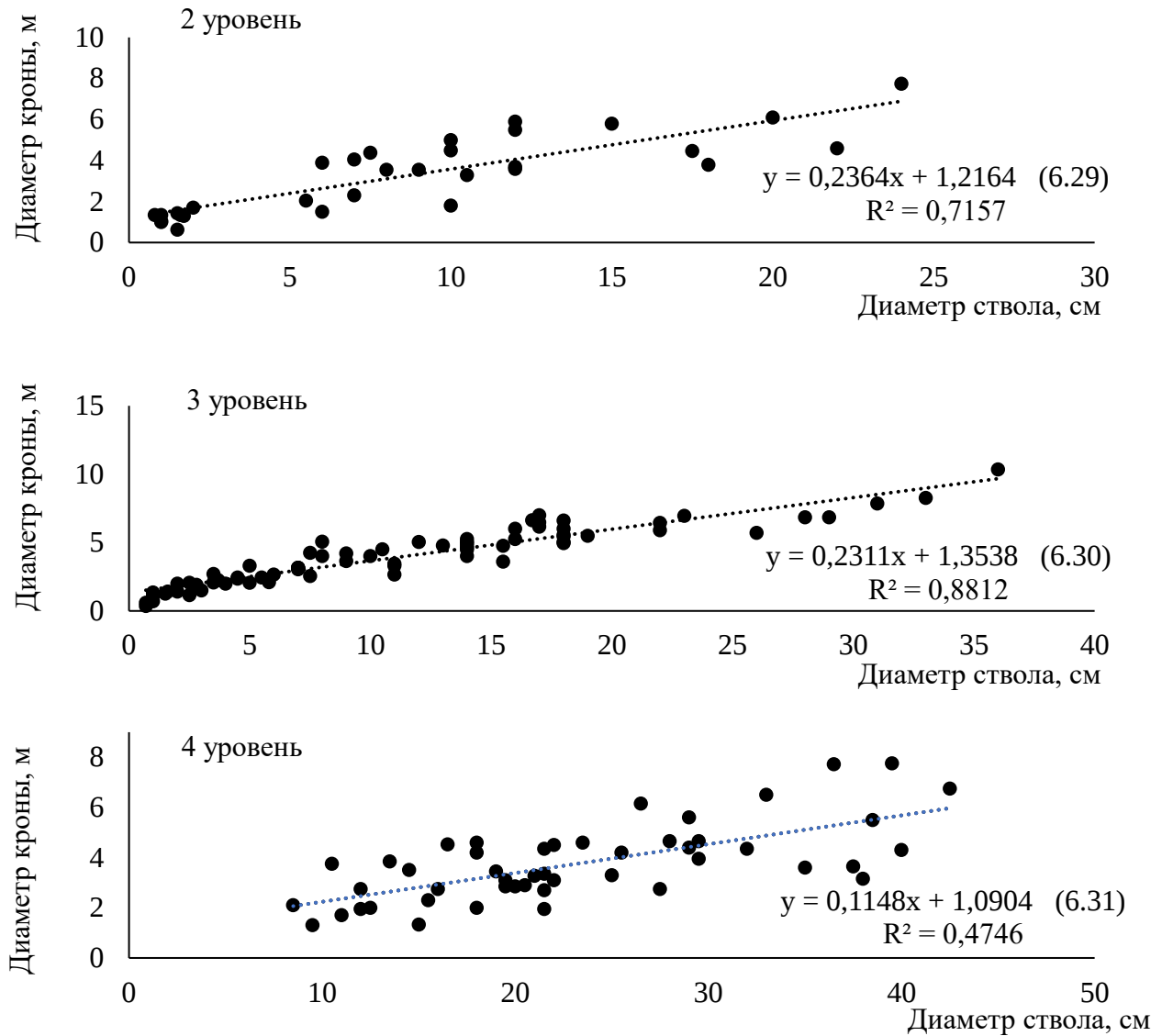


Рисунок 6.8 – Зависимость диаметра крон от диаметра стволов у деревьев лиственницы на разных высотных уровнях северного профиля

Результатам данной работы позволяют отметить, что связь между диаметрами стволов и крон заметно слабее, чем между диаметром и высотой стволов. Тем не менее на основе анализа представленных материалов можно отметить, что на исследуемых объектах между диаметром крон и диаметром стволов наблюдаются устойчивые, в большинстве случаев тесные связи. Коэффициент детерминации парных связей колеблется в диапазоне от 0,467 (на первом высотном уровне южного профиля) до 0,881 (на втором уровне северного профиля).

Графические данные и показатели разработанных уравнений свидетельствуют, что на всех объектах зависимость диаметра крон от диаметра стволов вполне удовлетворительно описывается уравнением прямой. Полученные уравнения корректны и адекватны экспериментальным материалам.

Рассчитанные по уравнениям данные свидетельствуют, что в целом при повышении высоты над уровнем моря у деревьев лиственницы одинаковой толщины диаметр крон увеличивается. Так, на западном профиле у деревьев диаметром 10 см диаметр крон на четвертом (самом нижнем уровне) составляет в среднем 1,82 м, на третьем – 2,80 м, на втором – 3,20 м и на первом – 3,38 м. Такое положение исследователи верхней границы леса (Бабенко, 2006; Бартыш, 2008; Григорьев, 2011) объясняют изменением рангового положения деревьев одинаковой толщины по мере продвижения вверх по склону. С увеличением высоты над уровнем моря, как отмечалось выше, уменьшаются полнота и возраст древостоев и ухудшаются условия их местопроизрастания. В этой связи деревья одной и той же толщины на вышележащих уровнях характеризуются более высоким рангом, чем на нижележащих уровнях. В древостоях деревья более высоких рангов отличаются лучшим развитием крон (Луганский, Нагимов, 1994).

На основе материалов таксации одиночно растущих деревьев сосны Р.А. Юкнис (1983) установил прямую пропорциональность между диаметром кроны и диаметром стволов и определил, что соотношение диаметра кроны (в м) с диаметром стволов (в см) составляет в среднем 0,20. Причину изменения данного соотношения в сомкнутых насаждениях он видит в конкуренции между деревьями.

Для установления соотношений между диаметрами крон и стволов нами проведены специальные исследования. Для каждого высотного уровня исследуемых профилей были получены уравнения зависимости диаметра крон ( $D_k$ ) от диаметра стволов ( $D_{1,3}$ ) вида:  $D_k = a * D_{1,3}$ . Сравнение результатов данных исследований с предыдущими (рис 6.5-6.8) показало, что уравнения прямой без свободного члена по адекватности и корректности не многим уступают приведенным выше уравнениям.

В тоже время значение коэффициента  $a$  уравнений вида  $D_k = a * D_{1,3}$  представляет собой искомое соотношение  $D_k / D_{1,3}$ .

Нами установлено, что значения соотношения  $D_k / D_{1,3}$  закономерно уменьшаются по мере снижения высоты над уровнем моря (повышения конкуренции между деревьями). На первом высотном уровне исследуемых профилей оно изменяется от 0,36 до 0,40, на втором – от 0,24 до 0,33, на третьем – от 0,24 до 0,31 и на четвертом – от 0,15 до 0,17. Вычисленные средние значения этого показателя в целом по всем профилям составляют: для первого высотного уровня 0,38, для второго – 0,31, для третьего – 0,25 и для четвертого – 0,18. В целом, результаты данных исследований подтверждают ранее сделанные выводы. В то же время они могут использоваться для приближенной оценки диаметров крон деревьев по диаметрам стволов.

### **6.2.3. Зависимость диаметра стволов от их высоты и диаметра крон**

Лесоустроительной инструкцией в число основных способов таксации лесного фонда включены дистанционные – аналитико-измерительное дешифрирование материалов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и автоматизированная обработка (классификация) и анализ материалов ДЗЗ (Лесоустроительная инструкция..., 2022). Применение этих способов особенно актуально в труднодоступных районах, к числу которых, безусловно, относится и плато Путорана.

При таксации лесов дистанционными способами обязательным условием является получение для таксируемого объекта материалов аэрокосмических съемок с соответствующими параметрами. На аэрокосмических снимках получают изображение лишь полога насаждений. Основные таксационные показатели определяются с использованием зависимостей между ними и таксационно–дешифровочными показателями, характеризующими древесный полог. При таких исследованиях особое внимание уделяется определению среднего диаметра древесных пород с использованием вспомогательных таблиц (или графиков), составленных на основе корреляционных уравнений, выражающих зависимость этого показателя от дешифрируемых на

снимках признаков (диаметра крон, высоты, относительной полноты, сомкнутости полога. Причем в специальной литературе отмечается (Сухих, 2005). предпочтительность определения среднего диаметра на основе многофакторных уравнений (с двумя и более определяющими факторами).

Современные программно-аппаратные комплексы, визуализирующие изображения в стереорежиме, позволяют по аэрофотоснимкам достаточно точно определить высоту деревьев и диаметры их крон. Поэтому при аналитико-измерительном дешифрировании материалов (ДЗЗ) большое внимание уделяется зависимости диаметра ствола от высоты и диаметра кроны дерева для определения вероятного значения первого показателя от двух последних. Следует отметить, что в древостоях ЭВГДР, характеризующихся низкой полнотой и сомкнутостью полога, диаметр кроны и высота дерева по снимкам определяются с большей объективностью и точностью, чем в густых, сомкнутых насаждениях.

Нами указанная зависимость изучалась по совокупности всех деревьев на исследуемых высотных уровнях – выявлялась связь между указанными тремя показателями деревьев в целом по стационару. На начальном этапе по объединенному массиву экспериментальных материалов нами проведен графический анализ зависимостей диаметра стволов от диаметра крон, а также диаметра крон от высоты стволов (рисунки 6.9–6.10).

В связи с тем, что в статистическую выборку объединены деревья лиственницы разных размеров и возраста, произрастающих на разных высотных уровнях исследуемых профилей, на графиках при анализе обнаруживается значительный разброс экспериментальных данных. Однако, результаты анализа свидетельствуют, что связи между линейными размерами стволов (диаметром и высотой) и размерами стволов с диаметром крон носят устойчивый, вполне закономерный характер.

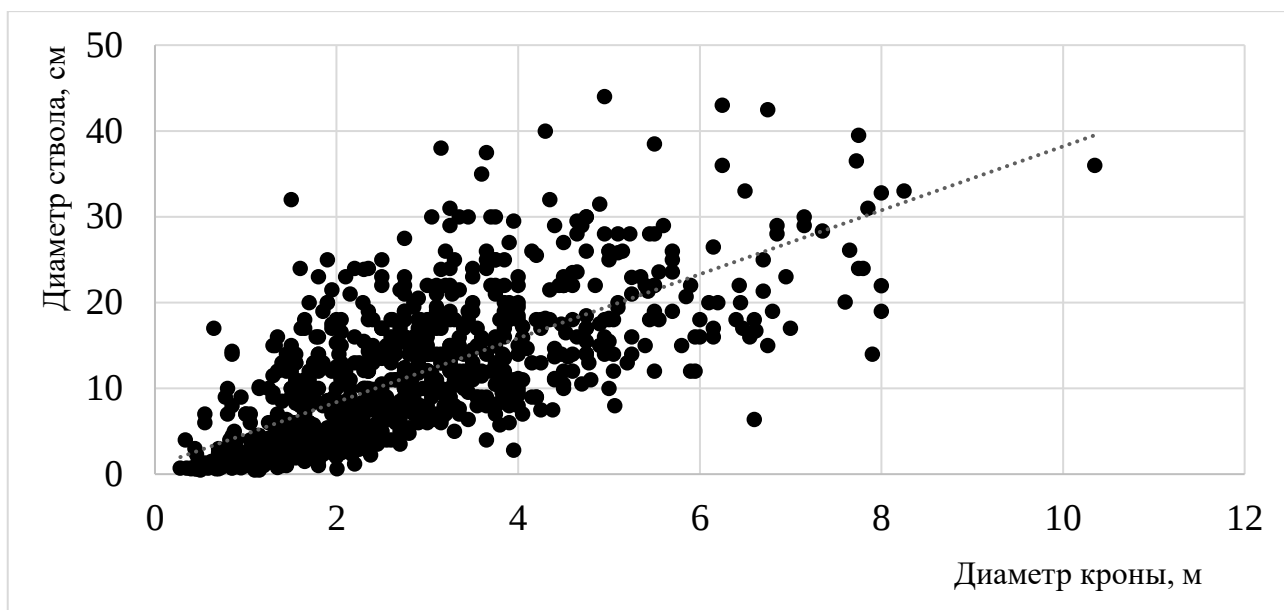


Рисунок 6.9 – Зависимость диаметра стволов от диаметра крон по совокупности всех деревьев лиственницы на исследуемом стационаре

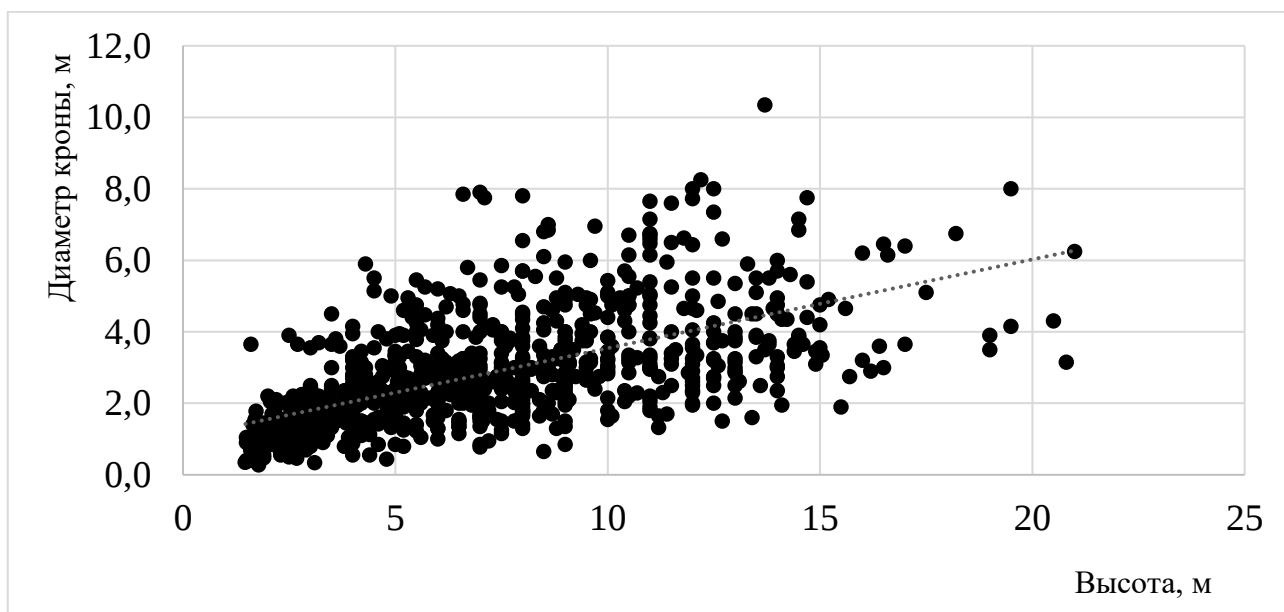


Рисунок 6.10 – Зависимость диаметра крон от высоты стволов по совокупности всех деревьев лиственницы на исследуемом стационаре

Указанные зависимости с небольшими допущениями можно признать линейными по форме. Связь между диаметром и высотой деревьев по объединенной

выборке по форме также близка к прямолинейной. Следует отметить, что наличие прямолинейных связей между размерами стволов и крон отмечается во многих работах (Неволин, 1967; Верхунов, 1975; Кузьмичев, 1977; Горячев, 1987; Луганский, Нагимов, 1994; Верхунов, Черных, 2009; Григорьев, 2011; и др.).

Прямолинейный характер зависимостей диаметра стволов от их высоты и диаметра кроны позволяет корректно связать указанные показатели в двухфакторном уравнении следующей структуры:

$$D_{1,3}=a \cdot H + b \cdot D_{кр} + c, \quad (6.32)$$

где  $D_{1,3}$  – диаметр ствола на высоте груди, см;

$H$  – высота ствола, м;

$D_{кр}$  – диаметр кроны дерева, м;

$a, b, c$  – константы уравнения.

Статистические показатели уравнения (6.31), разработанного по объединенному массиву экспериментальных материалов, приведены в таблице 6.3.

Таблица 6.3 – Статистические показатели уравнения вида:  $D_{1,3}=a \cdot H + b \cdot D_{кр} + c$ ,

|                                        |   |         |
|----------------------------------------|---|---------|
| Коэффициент детерминации               |   | 0,803   |
| Стандартная ошибка, см                 |   | 3,8     |
| Значения коэффициентов                 | a | 1,4691  |
|                                        | b | 1,4726  |
|                                        | c | -3,0594 |
| t-критерий Стьюдента при коэффициентах | a | 35,69   |
|                                        | b | 14,27   |
|                                        | c | -10,73  |

Из ее данных видно, что разработанное уравнение характеризуется высоким коэффициентом детерминации и сравнительно низкой стандартной ошибкой. По значению коэффициента детерминации можно сделать заключение, что в исследуемых древостоях высота и диаметр кроны деревьев вместе объясняют 80 % изменчи-

вости их диаметров ствола. При этом вклад высоты дерева (первой независимой переменной) в объяснение варьирования диаметра ствола (зависимой переменной) в объяснение варьирования диаметра ствола (зависимой переменной) существенно выше, чем диаметра кроны (второй независимой переменной): значение t-критерия Стьюдента для первой независимой переменной (35,69) заметно выше, чем для второй (14,27).

Следует также отметить, что все константы уравнения (в том числе и при обеих независимых переменных) в высшей степени достоверны ( $t_{\text{факт}} > t_{0,01}$ ).

В целом представленные выше материалы позволяют констатировать корректность и адекватность разработанного уравнения нашим экспериментальным данным. С применением данного уравнения разработана двухвходовая таблица (таблица 6.4), которая дает наглядное представление об изменении диаметра стволов в зависимости от их высоты и диаметра кроны и может успешно применяться при аналитико-измерительном дешифрировании материалов ДЗЗ.

При табулировании уравнения и составлении таблицы на основе графического анализа экспериментальных материалов устанавливались диапазоны варьирования диаметра кроны при фиксированных значениях высоты деревьев, а также высоты деревьев при фиксированных значениях диаметра кроны. Для установленных, таким образом, диапазонов определялись табличные значения диаметра стволов.

Анализ данных табл. 6.4 позволяют отметить, что диаметр стволов лиственницы закономерно увеличивается при одинаковой высоте деревьев с увеличением их диаметра кроны, а при фиксированных значениях диаметра кроны - с увеличением высоты. Подобные результаты были получены в лиственничниках, произрастающих в ЭВГДР Приполярного Урала (Григорьев, 2011). Указанная особенность изменения диаметра стволов в зависимости от высоты деревьев и диаметра их кроны вполне вписывается в известные положения и не требует специальных разъяснений.

Таблица 6.4 – Значения диаметров ствола деревьев лиственницы в ЭВГДР в зависимости от высоты деревьев и диаметра крон

|           | Диаметр крон, м |     |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|-----------|-----------------|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Высота, м | 0,5             | 1   | 1,5  | 2    | 2,5  | 3    | 3,5  | 4    | 4,5  | 5    | 5,5  | 6    | 6,5  | 7    | 7,5  | 8    |
| 1,5       |                 | 0,6 | 1,4  | 2,1  |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| 2         | 0,6             | 1,4 | 2,1  | 2,8  | 3,6  |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| 2,5       | 1,4             | 2,1 | 2,8  | 3,6  | 4,3  | 5,1  | 5,8  | 6,5  |      |      |      |      |      |      |      |      |
| 3         | 2,1             | 2,8 | 3,6  | 4,3  | 5,0  | 5,8  | 6,5  | 7,3  |      |      |      |      |      |      |      |      |
| 3,5       |                 | 3,6 | 4,3  | 5,0  | 5,8  | 6,5  | 7,3  | 8,0  | 8,7  |      |      |      |      |      |      |      |
| 4         |                 | 4,3 | 5,0  | 5,8  | 6,5  | 7,3  | 8,0  | 8,7  | 9,5  |      |      |      |      |      |      |      |
| 4,5       |                 | 5,0 | 5,8  | 6,5  | 7,3  | 8,0  | 8,7  | 9,5  | 10,2 | 10,9 | 11,7 | 12,4 |      |      |      |      |
| 5         |                 | 5,8 | 6,5  | 7,3  | 8,0  | 8,7  | 9,5  | 10,2 | 10,9 | 11,7 | 12,4 | 13,1 |      |      |      |      |
| 5,5       |                 | 6,5 | 7,2  | 8,0  | 8,7  | 9,5  | 10,2 | 10,9 | 11,7 | 12,4 | 13,1 | 13,9 |      |      |      |      |
| 6         |                 | 7,2 | 8,0  | 8,7  | 9,5  | 10,2 | 10,9 | 11,7 | 12,4 | 13,1 | 13,9 | 14,6 |      |      |      |      |
| 6,5       |                 | 8,0 | 8,7  | 9,5  | 10,2 | 10,9 | 11,7 | 12,4 | 13,1 | 13,9 | 14,6 | 15,3 | 16,1 |      |      |      |
| 7         |                 | 8,7 | 9,5  | 10,2 | 10,9 | 11,7 | 12,4 | 13,1 | 13,9 | 14,6 | 15,3 | 16,1 | 16,8 | 17,6 | 18,3 |      |
| 7,5       |                 | 9,5 | 10,2 | 10,9 | 11,7 | 12,4 | 13,1 | 13,9 | 14,6 | 15,3 | 16,1 | 16,8 | 17,6 | 18,3 | 19,0 |      |
| 8         |                 |     |      | 11,7 | 12,4 | 13,1 | 13,9 | 14,6 | 15,3 | 16,1 | 16,8 | 17,5 | 18,3 | 19,0 | 19,8 | 20,5 |
| 8,5       |                 |     |      | 12,4 | 13,1 | 13,9 | 14,6 | 15,3 | 16,1 | 16,8 | 17,5 | 18,3 | 19,0 | 19,8 | 20,5 | 21,2 |
| 9         |                 |     |      | 13,1 | 13,9 | 14,6 | 15,3 | 16,1 | 16,8 | 17,5 | 18,3 | 19,0 | 19,8 | 20,5 | 21,2 | 22,0 |
| 9,5       |                 |     |      | 13,9 | 14,6 | 15,3 | 16,1 | 16,8 | 17,5 | 18,3 | 19,0 | 19,8 | 20,5 | 21,2 | 22,0 | 22,7 |
| 10        |                 |     |      | 14,6 | 15,3 | 16,1 | 16,8 | 17,5 | 18,3 | 19,0 | 19,8 | 20,5 | 21,2 | 22,0 | 22,7 | 23,4 |
| 10,5      |                 |     |      | 15,3 | 16,1 | 16,8 | 17,5 | 18,3 | 19,0 | 19,7 | 20,5 | 21,2 | 22,0 | 22,7 | 23,4 | 24,2 |
| 11        |                 |     |      | 16,1 | 16,8 | 17,5 | 18,3 | 19,0 | 19,7 | 20,5 | 21,2 | 22,0 | 22,7 | 23,4 | 24,2 | 24,9 |
| 11,5      |                 |     |      |      | 17,5 | 18,3 | 19,0 | 19,7 | 20,5 | 21,2 | 22,0 | 22,7 | 23,4 | 24,2 | 24,9 | 25,6 |
| 12        |                 |     |      |      | 18,3 | 19,0 | 19,7 | 20,5 | 21,2 | 22,0 | 22,7 | 23,4 | 24,2 | 24,9 | 25,6 | 26,4 |
| 12,5      |                 |     |      |      | 19,0 | 19,7 | 20,5 | 21,2 | 22,0 | 22,7 | 23,4 | 24,2 | 24,9 | 25,6 | 26,4 | 27,1 |

Продолжение табл. 6.4.

| Высота, м | 0,5 | 1 | 1,5 | 2 | 2,5  | 3    | 3,5  | 4    | 4,5  | 5    | 5,5  | 6    | 6,5  | 7    | 7,5  | 8    |
|-----------|-----|---|-----|---|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 13        |     |   |     |   | 19,7 | 20,5 | 21,2 | 21,9 | 22,7 | 23,4 | 24,2 | 24,9 | 25,6 | 26,4 | 27,1 | 27,8 |
| 13,5      |     |   |     |   | 20,5 | 21,2 | 21,9 | 22,7 | 23,4 | 24,2 | 24,9 | 25,6 | 26,4 | 27,1 | 27,8 | 28,6 |
| 14        |     |   |     |   | 21,2 | 21,9 | 22,7 | 23,4 | 24,2 | 24,9 | 25,6 | 26,4 | 27,1 | 27,8 | 28,6 | 29,3 |
| 14,5      |     |   |     |   |      | 22,7 | 23,4 | 24,2 | 24,9 | 25,6 | 26,4 | 27,1 | 27,8 | 28,6 | 29,3 | 30,0 |
| 15        |     |   |     |   |      | 23,4 | 24,2 | 24,9 | 25,6 | 26,4 | 27,1 | 27,8 | 28,6 | 29,3 | 30,0 | 30,8 |
| 15,5      |     |   |     |   |      | 24,1 | 24,9 | 25,6 | 26,4 | 27,1 | 27,8 | 28,6 | 29,3 | 30,0 | 30,8 | 31,5 |
| 16        |     |   |     |   |      | 24,9 | 25,6 | 26,4 | 27,1 | 27,8 | 28,6 | 29,3 | 30,0 | 30,8 | 31,5 | 32,2 |
| 16,5      |     |   |     |   |      | 25,6 | 26,4 | 27,1 | 27,8 | 28,6 | 29,3 | 30,0 | 30,8 | 31,5 | 32,2 | 33,0 |
| 17        |     |   |     |   |      |      |      | 27,8 | 28,6 | 29,3 | 30,0 | 30,8 | 31,5 | 32,2 | 33,0 | 33,7 |
| 17,5      |     |   |     |   |      |      |      |      | 29,3 | 30,0 | 30,8 | 31,5 | 32,2 | 33,0 | 33,7 | 34,5 |
| 18        |     |   |     |   |      |      |      |      | 30,0 | 30,8 | 31,5 | 32,2 | 33,0 | 33,7 | 34,4 | 35,2 |
| 18,5      |     |   |     |   |      |      |      |      | 30,8 | 31,5 | 32,2 | 33,0 | 33,7 | 34,4 | 35,2 | 35,9 |
| 19        |     |   |     |   |      |      |      |      | 31,5 | 32,2 | 33,0 | 33,7 | 34,4 | 35,2 | 35,9 | 36,7 |
| 19,5      |     |   |     |   |      |      |      |      | 32,2 | 33,0 | 33,7 | 34,4 | 35,2 | 35,9 | 36,7 | 37,4 |
| 20        |     |   |     |   |      |      |      |      | 33,0 | 33,7 | 34,4 | 35,2 | 35,9 | 36,7 | 37,4 | 38,1 |

Приведенные выше материалы позволяют сделать заключение, что разработанное уравнение адекватно природным закономерностям изменения диаметра стволов лиственницы в исследуемом ЭВГДР. Оно и составленное на его основе таблица, могут успешно применяться в качестве нормативов при лесооценочных работах. В частности, с их использованием можно с вполне приемлемой точностью определить диаметр стволов по измеренным на аэрофотоснимках высотам деревьев и диаметрам их крон.

### **Выводы**

Разновозрастные древостой лиственницы, произрастающие в ЭВГДР, характеризуются следующими особенностями строения.

1. Древостой (совокупности крайне разновозрастных деревьев) отличаются значительным диапазоном изменения таксационных показателей деревьев – диаметра и высоты. По шкале С.А. Мамаева изменчивость диаметра стволов лиственницы на исследуемых объектах соответствует высокому и очень высокому уровню, а высот – повышенному, высокому и очень высокому. При прочих равных условиях коэффициенты изменчивости этих показателей в исследуемых древостоях в среднем в 1,3–1,9 раза выше, чем в отдельно взятых элементах леса. Чрезвычайно высокая изменчивость диаметра и высоты стволов в лиственничниках, в первую очередь связана их высокой разновозрастностью. Определенное влияние на размах рядов распределения деревьев по диаметру и высоте, концентрацию числа стволов по ступеням этих показателей, величину асимметрии и эксцесса рядов оказывает высота над уровнем моря.

2. Древостой имеют очень низкую производительность и характеризуются, как правило, Vб классом бонитета. Средние значения диаметра и высоты деревьев лиственницы на склонах любой экспозиции закономерно уменьшаются с повышением высоты над уровнем моря. Это связано снижением в этом направлении среднего возраста деревьев и ухудшением лесорастительных условий. В целом, различия по среднему диаметру и средней высоте между редианами (1 уровень) и редколесьями (2 уровень), а также между редколесьями и сомкнутыми лесами (4

уровень) более значительны, чем между редколесьями и древостоями у верхней границы сомкнутых лесов.

3. Лиственничники характеризуются крайне низкими значениями среднего общего прироста по диаметру и высоте. Наибольшими значениями этих показателей характеризуются древостои на южном, наиболее инсолируемом склоне, в которых прирост по диаметру по высотным уровням колеблется от 0,90 мм до 1,34 мм, а прирост по высоте – от 6,6 см до 8,3 см. Некоторое превосходство южного склона над остальными по величине среднего общего прироста по диаметру и высоте объясняется более благоприятными микроклиматическими условиями и сравнительно низким возрастом древостоев на данном склоне.

На каждом склоне проявляется тенденция увеличения среднего прироста по диаметру и высоте по мере снижения высотного положения древостоев, несмотря на увеличение в этом направлении их среднего возраста.

4. В древостоях, независимо от высоты их расположения относительно уровня моря, наблюдаются устойчивые, в большинстве случаев, тесные связи между таксационными показателями стволов и крон, в частности, между диаметром и высотой стволов, а также - между диаметром стволов и диаметром крон. Зависимость высоты деревьев от их диаметра на верхних высотных уровнях прямолинейна. Прямая пропорциональность между данными показателями нарушается по мере перехода от верхних высотных уровней к нижним, что объясняется усилением конкуренции между деревьями в этом направлении в результате повышения полноты и сомкнутости древостоев.

5. На количественные соотношения диаметров и высот деревьев определенное влияние оказывает высота над уровнем моря - наблюдается тенденция увеличения высоты у деревьев одинаковой толщины по мере ее снижения. Таким образом, по мере продвижения вниз по склону улучшаются условия для роста лиственницы в высоту и меняется разряд высоты древостоев.

6. Зависимость диаметра крон от диаметра стволов описывается уравнением прямой. При повышении высоты над уровнем моря у деревьев одинаковой толщины диаметр крон увеличивается, что в первую очередь объясняется улучшени-

ем рангового положения деревьев одинаковой толщины по мере продвижения вверх по склону. Отношение диаметра крон (в м) к диаметру ствола (в см) в целом по всем профилям в среднем составляет: для первого высотного уровня 0,38, для второго – 0,31, для третьего – 0,25 и для четвертого – 0,18. Эти данные могут быть использованы как коэффициенты для приближенной оценки диаметров крон деревьев по диаметрам стволов.

7. В совокупностях древостоев ЭВГДР 80% изменчивости диаметров стволов объясняется изменчивостью высоты стволов и диаметра кроны. В двухфакторном уравнении по оценке диаметра стволов, включающем в качестве определяющих факторов высоту стволов и диаметр крон, вклад первого фактора в объяснение варьирования диаметра ствола существенно выше, чем второго. Диаметр стволов лиственницы закономерно увеличивается при одинаковой высоте деревьев с увеличением их диаметра крон, а при фиксированных значениях диаметра крон - с увеличением высоты. Разработанное двухфакторное уравнение позволяет с достаточной точностью определить диаметр стволов по измеренным на аэрофотоснимках высотам деревьев и диаметрам их крон.

В целом, в ЭВГДР разновозрастные древостои, произрастающие на склонах той или иной экспозиции, а в пределах склонов – на разных высотных уровнях, характеризуются значительно большим диапазоном изменчивости таксационных показателей деревьев и меньшей теснотой связей между ними, чем отдельные элементы и поколения леса. Однако в них сохраняются закономерности строения древостоев по таксационным признакам, присущие элементам (поколениям) леса. Данное обстоятельство с биологических позиций характеризует их как сформировавшиеся природные объекты и указывает на возможность синтетической оценки разновозрастных древостоев, но в пределах выделяемых высотных уровней, на которых они представляют собой самостоятельные статистические совокупности. По результатам проведенной работы при лесоучетных работах высотные уровни целесообразно обосновывать в увязке с подпоясами ЭВГДР (отдельных деревьев, реди, редколесий), выделяемых П.Л. Горчаковским и С.Г. Шиятовым (1985).

Высокая гетерогенность строения древостоев является показателем их фитоценотической устойчивости. Поэтому есть основание констатировать, что формирующиеся в результате потепления климата на ранее безлесых территориях (горной тундре) насаждения в обозримом будущем способны поддерживать свое жизненное состояние и успешно выполнять в экстремальных условиях высокогорий важнейшие биосферные и экологические функции.

## **Глава 7. Запасы надземной фитомассы и депонированного углерода в древостоях лиственницы**

Исследования фитомассы деревьев и древостоев в ЭВГДР в нашей стране проведены в весьма ограниченном объеме (Деви, 2008; Григорьев, 2011; Моисеев и др., 2016; Гайсин, 2022; и др.). В тоже время их результаты чрезвычайно важны для оценки биосферной роли насаждений, произрастающих в высокогорьях. В частности, отмечаемое многими исследователями повышение верхней границы леса в горах, связанное с современным потеплением климата, свидетельствует о расширении площадей насаждений, обеспечивающих длительное консервирование углерода. Следует отметить, что насаждения в экстремальных условиях высокогорий характеризуются замедленным биологическим круговоротом, в них количество годичного опада преобладает над годичной нормой их разложения. Здесь депонирование углерода происходит не только в биомассе, но и в древесном детрите и гумусе. В этой связи, основной целью настоящих исследований явилось получение количественных данных о запасах надземной фитомассы и депонированного углерода в исследуемых древостоях лиственницы. Такие данные, безусловно, важны и могут быть использованы для оценки и прогноза биосферных функций (в частности, углеродного бюджета) лесов, формирующихся на ранее безлесных территориях плато Путорана в результате современных изменений климата.

Экспериментальным материалом в настоящих исследованиях послужили данные индивидуальных учетов всех деревьев лиственницы на научно-исследовательском стационаре (на разных профилях, а в пределах их - высотных уровнях), а также материалы таксации 38 модельных растений лиственницы (деревьев и подростов) с определением в абсолютно сухом состоянии их надземной фитомассы по фракциям.

## 7.1. Взаимосвязи между весовыми и размерными показателями деревьев лиственницы

При оценке запасов фитомассы древостоев важным этапом является исследования зависимостей массы отдельных структурных частей деревьев от их таксационных показателей. Они проводятся по данным срубленных модельных деревьев. Результаты их важны для определения фракций надземной фитомассы на уровне дерева, а также для разработки корректных регрессионных уравнений, используемых в последующем при определении запасов фитомассы древостоев.

В таблице 7.1 приведены пределы изменения таксационных показателей модельных растений, которые, как правило, используются в качестве независимых переменных при оценке фитомассы деревьев на основе уравнений, описывающих закономерные связи между их весовыми и размерными показателями. Они являются ориентиром при определении области применения разрабатываемых регрессионных уравнений.

Таблица 7.1 – Пределы изменений таксационных показателей и фракций надземной фитомассы модельных растений лиственницы

| Диаметр<br>ствола у<br>основания,<br>см | Диаметр<br>ствола на<br>высоте<br>груди, см | Высота,<br>м | Фитомасса, кг      |               |              |             |
|-----------------------------------------|---------------------------------------------|--------------|--------------------|---------------|--------------|-------------|
|                                         |                                             |              | общая<br>надземная | в том числе   |              |             |
|                                         |                                             |              |                    | ствола        | ветвей       | хвои        |
| Растений высотой до 1,5 м               |                                             |              |                    |               |              |             |
| 0,96-3,2                                | -                                           | 0,5-1,4      | 0,011-0,216        | 0,008-0,111   | 0,001-0,083  | 0,002-0,039 |
| Растений высотой более 1,5 м            |                                             |              |                    |               |              |             |
| 2,9-39,5                                | 1,3-31,9                                    | 1,7-13,6     | 0,209-262,765      | 0,139-207,571 | 0,036-39,265 | 0,021-7,053 |

Выборка модельных растений включала экземпляры лиственницы высотой от 0,52 до 13,60 м. Часть этих растений (высотой до 1,5 м) нами отнесены к подросту. Указанная выборка модельных растений (деревьев и подроста) являлась экспериментальной основой для определения надземной фитомассы на уровне древостоев лиственницы на всех исследуемых объектах (высотных уровнях профилей). Следует отметить, что более корректной была бы оценка фитомассы древостоев на каждом высотном уровне по модельным деревьям, взятым на соответ-

ствующем уровне. Однако в связи с удаленностью и труднодоступностью района, а также с сжатыми сроками и чрезвычайной трудоемкостью полевых работ сделать это не представлялось возможным. В тоже время, использование единого массива модельных растений для первичной оценки и выявления особенностей формирования фитомассы древостоев на исследуемых профилях, на наш взгляд, вполне приемлемо.

Фитомасса деревьев и их структурных частей зависит от множества факторов. Поэтому важным этапом при оценке фитомассы деревьев и древостоев является выбор наилучших факторов (таксационных показателей), объясняющих максимальную долю изменчивости тех или иных фракций фитомассы. Причем, суждения о том, какие показатели (переменные) предпочтительнее могут лежать вне статистических соображений (Нагимов, 2000). Важную роль здесь играют простота и точность измерения показателей, особенно при разработке моделей и нормативов для массового практического применения (Никитин, Швиденко, 1978). Большинство исследователей с учетом простоты и надежности определения в лесу, а также степени корреляции с фракциями фитомассы, в подобных исследованиях предпочтение отдают диаметру (D) и высоте (H) деревьев и их комбинации в виде  $D^2 \cdot H$ .

В настоящее время при оценке фитомассы в уравнениях множественной регрессии диаметр и высота деревьев используются совместно, что обеспечивает более полный учет влияния соотношений этих показателей на результирующий признак (Усольцев, 1985; Нагимов, 2020; и др.). В тоже время в специальной литературе указывается, что в уравнениях парной связи целесообразно использовать показатель  $D^2 \cdot H$  (Ватковский, 1968; Аткин, 1974; Семечкина, 1978; Биологическая продуктивность..., 1982; Вертикально-фракционное ..., 1986; и др).

Объем, собранного нами экспериментального материала, не позволил нам исследовать и оценить множественные связи фитомассы структурных частей деревьев с их таксационными показателями. В работе основной акцент сделан на исследование и анализ зависимостей фитомассы стволов, ветвей и хвои от диаметра стволов и показателя  $D^2 \cdot H$  с расчетом, что полученные при этом регресси-

онные уравнения позволят рассчитать надземную фитомассу древостоев по фракциям.

Следует отметить, что регрессионный метод позволяет более точно определить запас различных фракций фитомассы и получить полное представление о ее структуре. Кроме того, выравнивание значений фитомассы по ступеням таксационного признака (диаметра стволов) дает возможность составлять оценочные таблицы фитомассы на уровне дерева (Усольцев, Нагимов, 1988). Поэтому в наших исследованиях данному методу отдано предпочтение

На рисунке 7.1 представлены зависимости различных фракций надземной фитомассы модельных деревьев от их диаметра на высоте груди. При исследовании этих зависимостей и построении графиков использована уменьшенная выборка модельных деревьев (из 27 деревьев) - без растений, не достигших высоты 1,5 м. Точками на рисунке показаны данные модельных деревьев, использованных в дальнейшем при разработке уравнений.

Материалы, представленные на рис. 7.1 свидетельствуют, что зависимости массы стволов, живых ветвей и хвои от диаметра деревьев имеют вполне закономерный характер. Причем, криволинейный характер исследуемых зависимостей сомнений не вызывает. Наименьший разброс экспериментальных данных характерен для зависимости массы стволов от диаметра деревьев (рис. 7.1-А), а наибольший – для связи массы хвои с данным показателем (рис. 7.1-В).

Такое положение вполне объяснимо. Изменчивость фитомассы стволов в основном обусловлена двумя показателями – диаметром и высотой деревьев. На фитомассу крон (ветвей и хвои) помимо этих двух, значительное влияние оказывают другие показатели, в частности, возраст деревьев и их ценоотическое положение (Нагимов, 2000). Следует также отметить, что масса хвои на деревьях, как правило, определяется по навескам, что может обуславливать появление погрешностей, особенно при полевой обработке модельных деревьев.

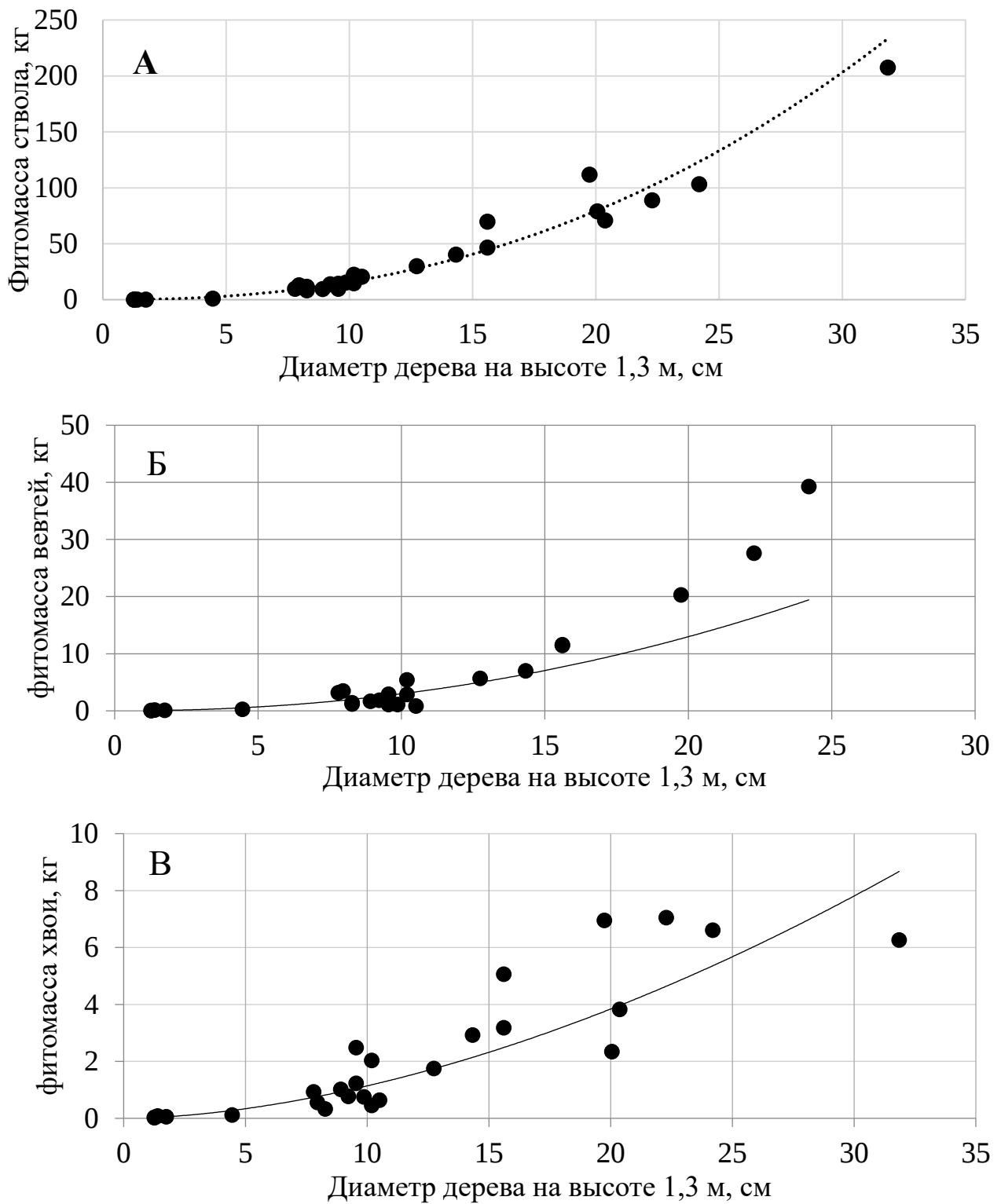


Рисунок 7.1 – Зависимость фитомассы стволов (А), ветвей (Б) и хвои (В) модельных деревьев от их диаметра на высоте груди

В целом, на всех трех графиках характер рассеивания экспериментальных точек обеспечивает достаточно точное и объективное их выравнивание. Криволи-

нейность зависимостей между коррелирующими параметрами свидетельствуют о необходимости подбора лучшей функции для их аналитического выражения. В настоящее время предложено множество уравнений для описания зависимости массы различных фракций фитомассы (ствол, крона, хвоя) от диаметра стволов. Наиболее часто применяются следующие уравнения (Нагимов и др., 2013):

$$y = a x + b \quad (7.1)$$

$$y = a x^2 + b x + c \quad (7.2)$$

$$y = a \ln x + b \quad (7.3)$$

$$y = a x^b \quad (7.4)$$

$$y = a b^x \quad (7.5)$$

$$y = a x^b + c \quad (7.6)$$

$$y = a x^b + e^{cx} \quad (7.7)$$

Пригодность тех или иных функций, как правило, определяется по наибольшему значению коэффициента детерминации ( $R^2$ ) и t-критериев Стьюдента для их параметров. Однако, большинство исследователей (Рокицкий, 1973; Кузьмичев, 1977; Усольцев, 1985; Нагимов, 2000; и др.) при описании подобных зависимостей используют степенную (аллометрическую) функцию (7.4), статистические параметры которой корректно объясняются с биологических позиций, а логарифмированием она может быть приведена к линейному виду:

$$\ln y = \ln a + b \ln x. \quad (7.8)$$

Известно, что регрессионные уравнения, построенные на основе линейных связей более наглядны и корректны (Никитин, Швиденко, 1978).

С использованием массива модельных деревьев нами рассчитаны уравнения зависимости абсолютно сухой фитомассы стволов ( $P_c$ ), живых ветвей ( $P_v$ ), хвои ( $P_x$ ), а также общей надземной массы деревьев ( $P_{н.ф.}$ ) от их диаметра ( $D_{1.3}$ ) вида  $P_i = a D_{1.3}^b$ . Общая надземная фитомасса деревьев содержала помимо массы стволов, ветвей и хвои, массу генеративных органов (шишек) и отмерших ветвей до кроны и в кроне. Характеристики полученных уравнений приведены в таблице 7.2.

Таблица 7.2 – Характеристики уравнений зависимости фракций фитомассы деревьев лиственницы от их диаметра вида:  $P_i = a D_{1.3}^b$

| Фракции фитомассы | Значения коэффициентов |        | $R^2$ | № уравнения |
|-------------------|------------------------|--------|-------|-------------|
|                   | $a$                    | $b$    |       |             |
| Ствол             | 0,0759                 | 2,3205 | 0,980 | (7.9)       |
| Ветви             | 0,0229                 | 2,1166 | 0,901 | (7.10)      |
| Хвоя              | 0,0202                 | 1,7517 | 0,846 | (7.11)      |
| Общая надземная   | 0,1287                 | 2,2212 | 0,978 | (7.12)      |

Анализируя данные таблицы 7.2 необходимо отметить, что область применения разработанных уравнений ограничивается диапазоном варьирования значений диаметра модельных деревьев, использованного в качестве независимой переменной. В используемой выборке диаметры модельных деревьев варьируют в диапазоне от 1,3 до 31,9 см (таблица 7.1).

Из данных таблицы 7.2 видно, что с диаметром деревьев наиболее сильно выражена связь массы стволов. Коэффициент детерминации указанной связи составляет 0,980. Наименьшей теснотой ( $R^2 = 0,846$ ) характеризуется связь массы хвои с диаметром деревьев. Данное обстоятельство, как отмечалось выше, объясняется большей изменчивостью массы хвои и большими погрешностями в ее определении при полевой обработке модельных деревьев (Нагимов, 2000). Связь массы ветвей с диаметром деревьев по тесноте занимает промежуточное положение между рассмотренными. В целом, можно отметить, что разработанные уравнения (7.9-7.12) адекватны экспериментальным данным и корректно передают характер исследуемых зависимостей. По ним можно рассчитать фитомассу стволов, ветвей и хвои для деревьев лиственницы любого диаметра. Следует отметить, что наличие тесных связей между фракциями фитомассы и толщиной деревьев отмечают многие исследователи (Семечкина, 1978; Усольцев, 1985; Луганский, Нагимов, 1994; и др.).

С использованием разработанных уравнений составлена таблица изменения фракций надземной фитомассы деревьев лиственницы в зависимости от их диаметра в исследуемых древостоях (табл. 7.3). Табличные данные свидетельствуют,

что с увеличением диаметра деревьев масса всех исследуемых фракций закономерно возрастает ускоряющимися темпами. Фитомасса стволов у наиболее толстых деревьев в 535, ветвей – в 306, хвои – в 112 раз больше, чем у самых тонких.

В исследуемых лиственничниках наблюдаются четкие закономерности не только в изменении абсолютных значений компонентов надземной фитомассы в зависимости от диаметра деревьев, но и соотношении последних между собой. В общей надземной фитомассе у деревьев различного диаметра вес стволов составляет 63,3-82,7%, ветвей - 12,5-16,6%, а хвои - 3,2-11,7%. Таким образом, в надземной фитомассе деревьев лиственницы преобладают в основном органы длительно аккумулирующие органическое вещество – стволы и ветви. Чем больше возраст органа дерева, тем выше его доля в общей фитомассе. Эти результаты полностью согласуются с литературными данными (Поздняков и др., 1969; Семечкина, 1978; Аткин, 1994; Нагимов, 2000; Григорьев, 2011; и др.).

Таблица 7.3 – Изменение фракций надземной фитомассы деревьев лиственницы в зависимости от их диаметра на высоте 1,3 м

| Диаметр,<br>см | Абсолютно сухая фитомасса, кг |      |        |                 |
|----------------|-------------------------------|------|--------|-----------------|
|                | ствола                        | хвои | ветвей | Общая надземная |
| 2              | 0,38                          | 0,07 | 0,10   | 0,60            |
| 4              | 1,89                          | 0,23 | 0,43   | 2,80            |
| 6              | 4,85                          | 0,47 | 1,02   | 6,89            |
| 8              | 9,46                          | 0,77 | 1,87   | 13,05           |
| 10             | 15,88                         | 1,14 | 3,00   | 21,42           |
| 12             | 24,24                         | 1,57 | 4,41   | 32,11           |
| 14             | 34,66                         | 2,06 | 6,11   | 45,22           |
| 16             | 47,25                         | 2,60 | 8,10   | 60,84           |
| 18             | 62,10                         | 3,19 | 10,39  | 79,03           |
| 20             | 79,30                         | 3,84 | 12,99  | 99,87           |
| 22             | 98,93                         | 4,54 | 15,89  | 123,41          |
| 24             | 121,07                        | 5,29 | 19,11  | 149,73          |
| 26             | 145,78                        | 6,08 | 22,63  | 178,86          |
| 28             | 173,13                        | 6,92 | 26,48  | 210,87          |
| 30             | 203,19                        | 7,81 | 30,64  | 245,79          |

С увеличением толщины деревьев удельный вес стволовой массы неуклонно повышается, а кроновой (ветвей и хвои), наоборот, снижается. Данный резуль-

тат соответствует данным, полученным другими исследователями в высокогорьях (Григорьев, 2011), но не соответствует данным, приводимым для равнинных лесов (Луганский, Нагимов, 1994; Нагимов, 2000). Таким образом, в условиях высокогорий обнаруживается специфика в динамике соотношений фракций надземной фитомассы деревьев, связанной с изменением их толщины.

Наглядное представление о структуре надземной фитомассы деревьев лиственницы разной толщины дают данные, приведенные на рисунке 7.2.

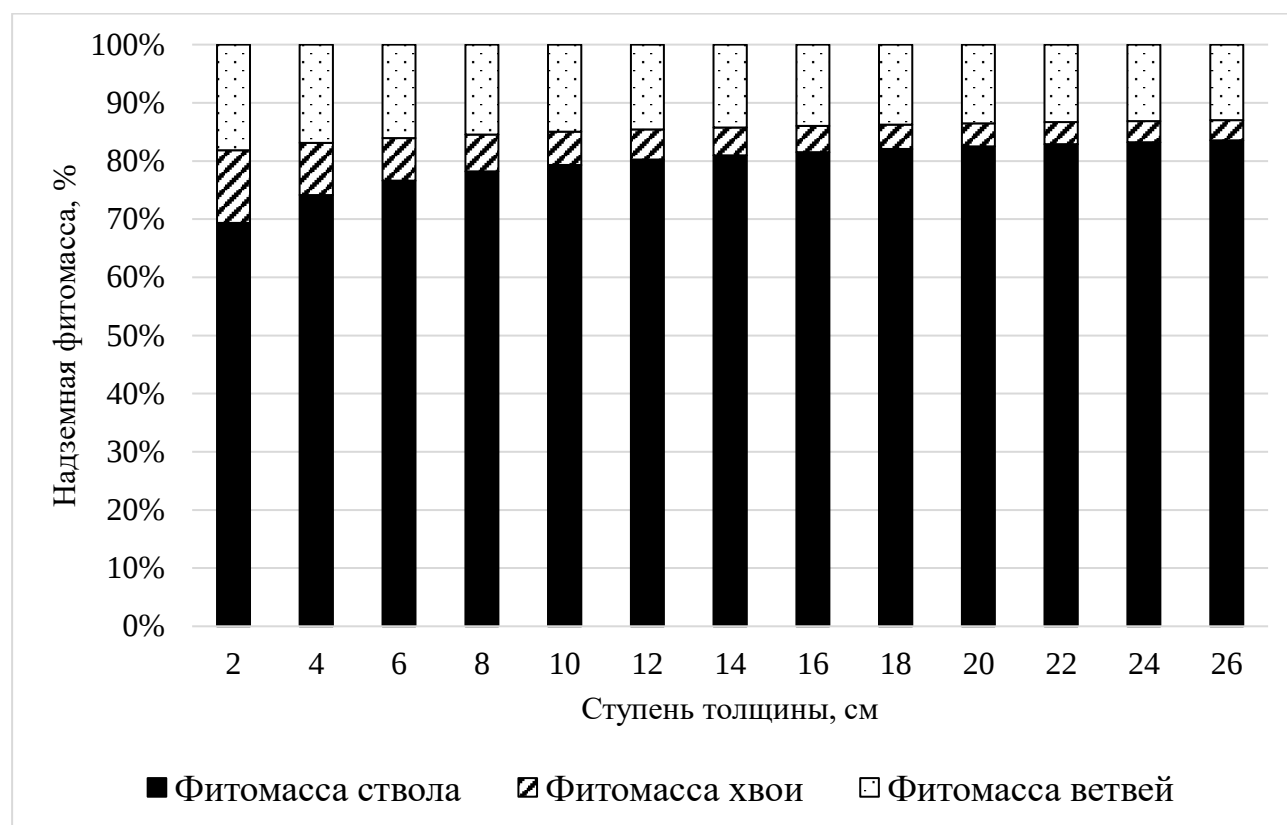


Рисунок 7.2 – Структура надземной фитомассы деревьев лиственницы различной толщины

Они свидетельствуют, что процентные соотношения фракций надземной фитомассы деревьев закономерно изменяются по мере увеличения их толщины. Вес хвои в общей фитомассе крон (охвоенность крон) у деревьев различного диаметра составляет 20,3-41,2%. Эти данные заметно выше результатов, полученных в высокогорных древостоях лиственницы сибирской Приполярного Урала (Григорьев, 2011), в которых охвоенность крон деревьев толщиной от 2 до 30 см со-

ставляет от 9,7 до 30,9%. Возможно, это связано с видовыми *Larix gmelinii* (Rupr.) Rupr. и *Larix sibirica* Ledeb. С увеличением толщины деревьев процент хвои закономерно снижается. Данный результат согласуется с литературными данными. З.Я. Нагимовым (2000) установлено, что при прочих равных условиях охвоенность крон увеличивается с уменьшением диаметра деревьев.

Ряд исследователей (Дэви, 2008; Гайсин, 2022) с учетом низких показателей роста деревьев в высокогорьях (некоторые из которых не достигают высоты 1,3 м) при оценке фитомассы деревьев и древостоев регрессионным методом считают целесообразным в оценочных уравнениях в качестве определяющего фактора использовать не диаметр стволов на высоте груди ( $D_{1.3}$ ), а диаметр у их основания ( $D_o$ )

Предварительный графический анализ экспериментального материала показал, что зависимости фракций надземной фитомассы от диаметра стволов у основания по характеру очень близки к рассмотренным выше (рис 7.1). Поэтому полученные графики в диссертации не приводятся. Рассчитанные с использованием массива модельных деревьев уравнения зависимости абсолютно сухой фитомассы стволов ( $P_c$ ), живых ветвей ( $P_v$ ), хвои ( $P_x$ ), а также общей надземной массы деревьев ( $P_{н.ф}$ ) от их диаметра у основания ( $D_o$ ), представлены в табл. 7.4.

Таблица 7.4 – Характеристики уравнений зависимости фракций фитомассы деревьев лиственницы от их диаметра у основания вида:  $P_i = a D_o^b$

| Фракции фитомассы | Значения коэффициентов |        | $R^2$ | № уравнения |
|-------------------|------------------------|--------|-------|-------------|
|                   | $a$                    | $b$    |       |             |
| Ствол             | 0,0056                 | 2,8798 | 0,994 | (7.13)      |
| Ветви             | 0,0024                 | 2,5910 | 0,958 | (7.14)      |
| Хвоя              | 0,0034                 | 2,1047 | 0,947 | (7.15)      |
| Общая надземная   | 0,0116                 | 2,7251 | 0,993 | (7.16)      |

В целом результаты данных исследований свидетельствуют о принципиальном сходстве полученных результатов с представленными выше материалами оценки фитомассы деревьев с использованием их диаметра на высоте груди. На

основе анализа значений коэффициентов детерминации, приведенных в табл. 7.2 и 7.4, можно отметить, что при оценке всех фракций надземной фитомассы использование в уравнениях в качестве определяющих факторов диаметра деревьев на высоте груди и диаметра их у основания обеспечивают примерно одинаковую точность. Причем на основе регрессионных уравнений с определяющим фактором  $D_o$ , фитомасса стволов оценивается точнее ( $R^2=0,994$ ), чем ветвей ( $R^2=0,958$ ), а массы ветвей – точнее, чем хвои ( $R^2=0,947$ ). Объяснение такому положению было дано выше. Разработанные уравнения (7.13–7.16) адекватны экспериментальным данным и корректно передают характер исследуемых зависимостей. По ним можно рассчитать фитомассу стволов, ветвей и хвои для деревьев лиственницы по диаметрам стволов, определенных у их основания.

Разработанная с использованием уравнений (7.13–7.16) таблица изменения фракций надземной фитомассы деревьев лиственницы в зависимости от их диаметра у основания приведена ниже (табл. 7.5).

Сопоставление данных, приведенных в таблицах 7.3 и 7.5, позволяет констатировать, что закономерности изменения массы структурных компонентов деревьев, а также их соотношений между собой в зависимости от диаметра деревьев на высоте груди и от диаметра у их основания имеют принципиальное сходство при некотором расхождении абсолютных и относительных величин. Это свидетельствует о корректности использованных методов и разработанных уравнений по оценке надземной фитомассы на уровне деревьев. Разработанные уравнения вполне приемлемы для оценки запасов фитомассы на уровне древостоев.

Однако следует отметить, что при определении запасов фитомассы древостоев на разных высотных уровнях на основе общих уравнений, более обоснованные результаты следует ожидать при использовании в уравнениях в качестве определяющего фактора не  $D_{1,3}$  или  $D_o$ , а комбинации из двух показателей –  $D_{1,3}^2 \cdot H$  или  $D_o^2 \cdot H$ . Подтверждением данного предположения служат результаты наших предыдущих исследований.

Таблица 7.5 – Изменение фракций надземной фитомассы деревьев лиственницы в зависимости от их диаметра у основания

| Диаметр ствола у основания,<br>см | Абсолютно сухая фитомасса, кг |      |        |                 |
|-----------------------------------|-------------------------------|------|--------|-----------------|
|                                   | ствола                        | хвои | ветвей | общая надземная |
| 2                                 | 0,04                          | 0,01 | 0,01   | 0,08            |
| 4                                 | 0,30                          | 0,06 | 0,09   | 0,51            |
| 6                                 | 0,98                          | 0,15 | 0,25   | 1,53            |
| 8                                 | 2,23                          | 0,27 | 0,52   | 3,35            |
| 10                                | 4,25                          | 0,43 | 0,94   | 6,16            |
| 12                                | 7,18                          | 0,64 | 1,50   | 10,12           |
| 14                                | 11,20                         | 0,88 | 2,24   | 15,41           |
| 16                                | 16,45                         | 1,16 | 3,16   | 22,17           |
| 18                                | 23,09                         | 1,49 | 4,29   | 30,56           |
| 20                                | 31,28                         | 1,86 | 5,64   | 40,73           |
| 22                                | 41,16                         | 2,27 | 7,22   | 52,81           |
| 24                                | 52,89                         | 2,73 | 9,04   | 66,94           |
| 26                                | 66,60                         | 3,23 | 11,13  | 83,25           |
| 28                                | 82,44                         | 3,78 | 13,48  | 101,88          |
| 30                                | 100,56                        | 4,37 | 16,12  | 122,96          |
| 32                                | 121,11                        | 5,59 | 16,44  | 146,81          |
| 34                                | 144,21                        | 6,36 | 19,16  | 173,18          |

В частности, было доказано, что деревья одинакового диаметра на разных высотных уровнях имеют разные высоты, а, следовательно, объемы и массу стволов. Поэтому более высокая корректность определения фитомассы стволов по показателю  $D_{1,3}^2 \cdot H$  ( $D_o^2 \cdot H$ ) вполне очевидна. В специальной литературе отмечается, что комбинация двух переменных (диаметра и высоты) по сравнению с диаметром стволов обеспечивает более высокую точность и при оценке массы крон (Усольцев, 1985; Нагимов, 2000). Обоснованность и корректность применения показателя  $D_o^2 \cdot H$  в уравнениях при оценке запасов фитомассы древостоев в высокогорьях наглядно показано в работе И.К. Гайсина и др. (2020).

В связи с вышеизложенным, нами с использованием данных 27 модельных деревьев, была исследована зависимость массы их структурных компонентов от

показателя  $D_{1,3}^2 \cdot H$ . Наглядно они показаны на рис. 7.3. Данные, представленные на рис. 7.3 свидетельствуют, что зависимости массы стволов, ветвей и хвои от показателя  $D_{1,3}^2 \cdot H$  носят прямолинейный характер. Наименьший разброс экспериментальных данных характерен для зависимости массы стволов от показателя  $D_{1,3}^2 \cdot H$  деревьев (рис. 7.3-А), а наибольший – для связи массы хвои с данным показателем (рис. 7.3-В). Такой результат соответствуют ранее сделанным выводам.

С использованием массива модельных деревьев нами разработаны уравнения зависимости абсолютно сухой фитомассы стволов ( $P_c$ ), ветвей ( $P_v$ ), хвои ( $P_x$ ), а также общей надземной массы деревьев ( $P_{н.ф}$ ) от их показателя  $D_{1,3}^2 \cdot H$  вида:  $P_i = a \cdot D_{1,3}^2 \cdot H + b$ . Характеристики рассчитанных уравнений приведены в табл. 7.6.

Таблица 7.6 – Характеристики уравнений зависимости фракций фитомассы деревьев лиственницы от их показателя  $D_{1,3}^2 \cdot H$  вида:  $P_i = a \cdot D_{1,3}^2 \cdot H + b$

| Фракции фитомассы | Значения коэффициентов |         | $R^2$ | № уравнения |
|-------------------|------------------------|---------|-------|-------------|
|                   | $a$                    | $b$     |       |             |
| Ствол             | 149,4900               | 5,3103  | 0,964 | (7.17)      |
| Ветви             | 46,8330                | -0,5973 | 0,961 | (7.18)      |
| Хвоя              | 10,5080                | 0,3751  | 0,900 | (7.19)      |
| Общая надземная   | 222,1500               | 4,6288  | 0,958 | (7.20)      |

Анализируя данные табл. 7.6 необходимо отметить, что область применения разработанных уравнений ограничивается диапазоном варьирования значений показателя  $D_{1,3}^2 \cdot H$  модельных деревьев, использованного в качестве независимой переменной. При определении этого показателя и диаметр, и высота деревьев выражались в метрах. В используемой выборке  $D_{1,3}^2 \cdot H$  модельных деревьев варьируют в диапазоне от 0,002 до 1,5 м<sup>3</sup> (табл. 7.1).

Значения коэффициента детерминации ( $R^2$ ) уравнений (7.17–7.20) свидетельствуют, что изменчивость всех фракций надземной фитомассы деревьев существенно образом определяется их показателем  $D_{1,3}^2 \cdot H$ . Вполне логично, что масса стволов на основе этого показателя устанавливается точнее ( $R^2=0,964$ ), чем масса ветвей ( $R^2=0,961$ ), а масса ветвей – точнее, чем масса хвои ( $R^2=0,900$ ). В

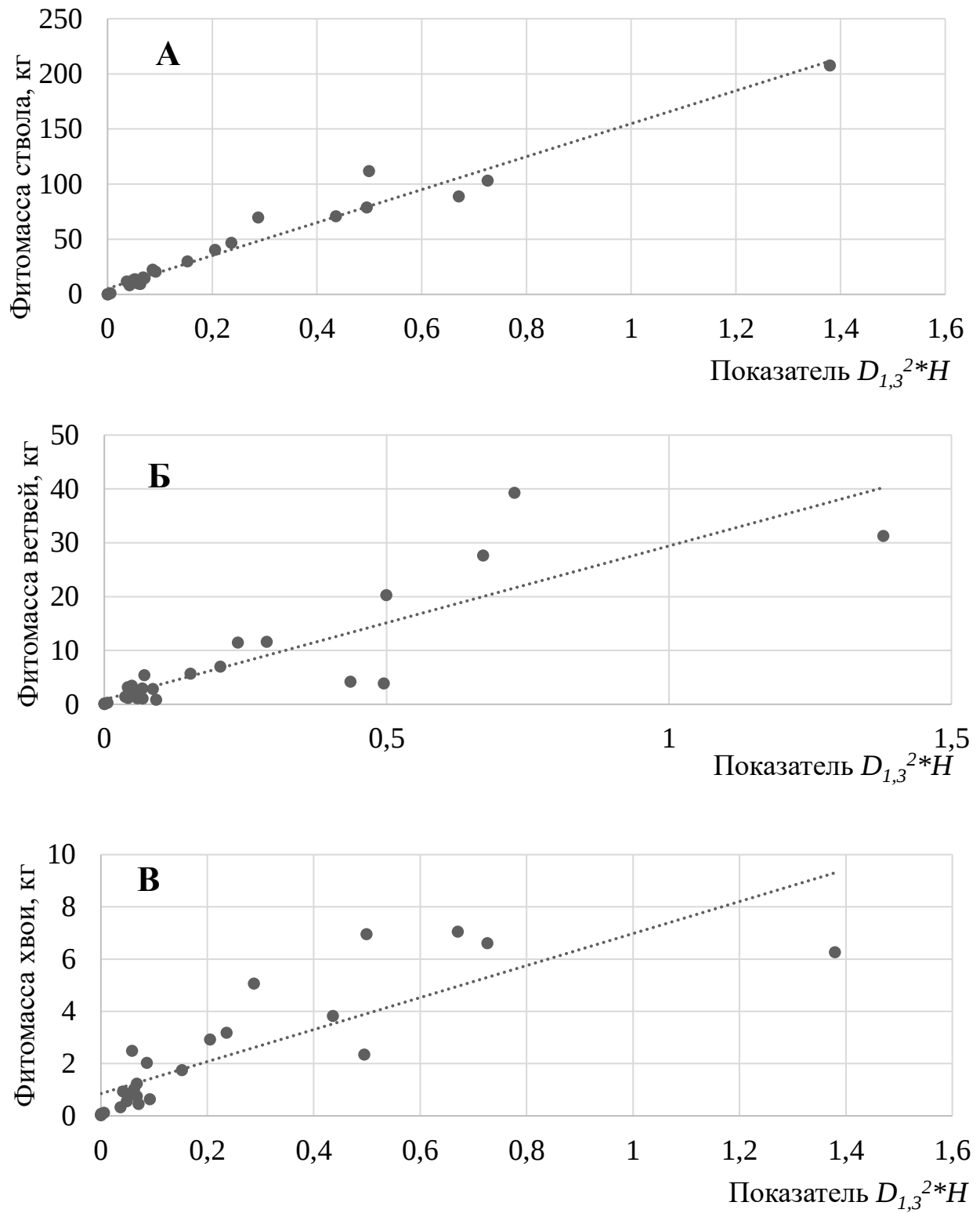


Рисунок 7.3 – Зависимость фитомассы стволов (А), ветвей (Б) и хвои (В) модельных деревьев от их показателя  $D_{1,3}^{2*H}$ .

целом, можно констатировать, что полученные уравнения адекватны экспериментальным материалам и корректно передают характер исследуемых зависимостей.

По ним можно рассчитать фитомассу стволов, ветвей и хвои, а также общую надземную для деревьев лиственницы по значениям их показателя  $D_{1,3}^2H$ .

С использованием разработанных уравнений составлена таблица изменения массы составных компонентов надземной фитомассы деревьев лиственницы в зависимости от их показателя  $D_{1,3}^2H$  (табл. 7.7).

Таблица 7.7 – Изменение фракций надземной фитомассы деревьев лиственницы в зависимости от показателя  $D_{1,3}^2H$

| Показатель<br>$D_{1,3}^2H$ , м <sup>3</sup> | Абсолютно сухая фитомасса, кг |       |        |                 |
|---------------------------------------------|-------------------------------|-------|--------|-----------------|
|                                             | ствола                        | хвои  | ветвей | общая надземная |
| 0,1                                         | 20,26                         | 1,43  | 4,09   | 26,84           |
| 0,2                                         | 35,21                         | 2,48  | 8,77   | 49,06           |
| 0,3                                         | 50,16                         | 3,53  | 13,45  | 71,27           |
| 0,4                                         | 65,11                         | 4,58  | 18,14  | 93,49           |
| 0,5                                         | 80,06                         | 5,63  | 22,82  | 115,70          |
| 0,6                                         | 95,00                         | 6,68  | 27,50  | 137,92          |
| 0,7                                         | 109,95                        | 7,73  | 32,19  | 160,13          |
| 0,8                                         | 124,90                        | 8,78  | 36,87  | 182,35          |
| 0,9                                         | 139,85                        | 9,83  | 41,55  | 204,56          |
| 1,0                                         | 154,80                        | 10,88 | 46,24  | 226,78          |
| 1,1                                         | 169,75                        | 11,93 | 50,92  | 248,99          |
| 1,2                                         | 184,70                        | 12,98 | 55,60  | 271,21          |
| 1,3                                         | 199,65                        | 14,04 | 60,29  | 293,42          |
| 1,4                                         | 214,60                        | 15,09 | 64,97  | 315,64          |
| 1,5                                         | 229,55                        | 16,14 | 69,65  | 337,85          |

Представленная таблица может служить нормативно-справочным материалом при определении массы структурных частей деревьев лиственницы (ствола, ветвей и хвои) в исследуемом районе.

Подводя итог исследованиям по оценке надземной фитомассы деревьев на основе регрессионных уровней, описывающих закономерные связи между их весовыми и размерными показателями, можно отметить следующее. Закономерности изменения массы структурных компонентов деревьев, а также их

соотношений между собой в зависимости от диаметра деревьев на высоте груди, диаметра у их основания и показателя  $D_{1,3}^2H$  имеют принципиальное сходство при некотором расхождении абсолютных и относительных величин.

В целом, разработанные уравнения вполне приемлемы для оценки запасов фитомассы на уровне древостоев регрессионным методом. Причем, учитывая высокую корреляцию и прямолинейный характер связей между массой структурных компонентов деревьев и показателем  $D_{1,3}^2H$ , при определении запасов фитомассы предпочтительны уравнения, в которых определяющим фактором выступает именно показатель  $D_{1,3}^2H$ .

## **7.2. Запасы надземной фитомассы и депонированного углерода в исследуемых лиственничниках**

Определение запасов фракций фитомассы проводилось регрессионным методом (Усольцев, Нагимов, 1988; Нагимов и др., 2013). Оно заключается в следующем. На первом этапе на основе данных модельных деревьев разрабатываются уравнения связи фитомассы отдельных фракций с легко определяемыми, технологичными таксационными показателями деревьев. Результаты этой работы представлены в предыдущем разделе. На втором этапе с использованием полученных уравнений определяются конкретные значения фитомассы для отдельных деревьев (при подеревной таксации) или средние значения фитомассы для их групп (классов толщины, ступеней толщины). На последнем этапе суммированием фитомассы отдельных деревьев или их групп определяются итоговые значения фитомассы для таксируемого древостоя. При определении фитомассы по сгруппированным данным (ступеням толщины) вначале полученные по уравнениям значения фитомассы по каждой ступени толщины перемножаются на число стволов в соответствующих ступенях.

Нами запасы надземной фитомассы по фракциям на единице площади вычислялись с использованием уравнений (7.17–7.20) и материалов фактического распределения деревьев лиственницы на высотных уровнях исследуемых профилей по показателю  $D_{1,3}^2H$ . При этом на каждом высотном уровне профилей внача-

ле для каждого дерева определялся показатель  $D_{1,3}^2H$  и постановкой его в соответствующее уравнение устанавливались значения массы его структурных компонентов. Затем суммированием фитомассы всех учтенных на опытных объектах деревьев вычислены запасы фитомассы древостоев на 1 га. Результаты этих вычислений приведены в табл. 7.8.

Таблица 7.8 – Запасы фракций надземной фитомассы лиственничных древостоев

| Профиль   | Высотные уровни | Наземная фитомасса (в числителе кг/га, в знаменателе - %) |         |        |         |         |
|-----------|-----------------|-----------------------------------------------------------|---------|--------|---------|---------|
|           |                 | Стволов                                                   | Крон    |        |         | Общая   |
|           |                 |                                                           | Ветвей  | Хвои   | Итого   |         |
| 1         | 2               | 3                                                         | 4       | 5      | 6       | 7       |
| Западный  | 1               | 4768,0                                                    | 426,8   | 337,2  | 763,9   | 5531,9  |
|           |                 | 86,2                                                      | 7,7     | 6,1    | 13,8    | 100     |
|           | 2               | 10591,0                                                   | 2531,9  | 750,3  | 3282,1  | 13873,1 |
|           |                 | 76,3                                                      | 18,3    | 5,4    | 23,7    | 100     |
|           | 3               | 40390,0                                                   | 10173,0 | 2861,5 | 13034,5 | 53424,5 |
|           |                 | 75,6                                                      | 19,0    | 5,4    | 24,4    | 100     |
|           | 4               | 36486,1                                                   | 9914,7  | 2585,5 | 12500,2 | 48986,3 |
|           |                 | 74,5                                                      | 20,2    | 5,3    | 25,5    | 100     |
| Восточный | 1               | 1132,7                                                    | 163,4   | 80,2   | 243,6   | 1376,2  |
|           |                 | 82,3                                                      | 11,9    | 5,8    | 17,7    | 100     |
|           | 2               | 9170,8                                                    | 2104,9  | 649,6  | 2754,4  | 11925,3 |
|           |                 | 76,9                                                      | 17,7    | 5,4    | 23,1    | 100     |
|           | 3               | 23114,5                                                   | 5429,0  | 1637,3 | 7066,3  | 30180,8 |
|           |                 | 76,6                                                      | 18,0    | 5,4    | 23,4    | 100     |
|           | 4               | 51015,7                                                   | 14234,5 | 3615,4 | 17849,9 | 68865,6 |
|           |                 | 74,1                                                      | 20,7    | 5,2    | 25,9    | 100     |
| Южный     | 1               | 962,0                                                     | 36,8    | 68,0   | 104,8   | 1066,8  |
|           |                 | 90,2                                                      | 3,5     | 6,4    | 9,8     | 100     |
|           | 2               | 10017,9                                                   | 1430,2  | 708,8  | 2139,0  | 12156,9 |
|           |                 | 82,4                                                      | 11,8    | 5,8    | 17,6    | 100     |
|           | 3               | 19606,3                                                   | 4961,4  | 1389,1 | 6350,5  | 25956,8 |
|           |                 | 75,5                                                      | 19,1    | 5,4    | 24,5    | 100     |
|           | 4               | 31221,4                                                   | 8651,3  | 2212,6 | 10863,9 | 42085,3 |
|           |                 | 74,2                                                      | 20,6    | 5,3    | 25,8    | 100     |
| Северный  | 1               | —                                                         | —       | —      | —       | —       |
|           | 2               | 3439,1                                                    | 668,3   | 243,5  | 911,8   | 4350,9  |
|           |                 | 79,0                                                      | 15,4    | 5,6    | 21,0    | 100     |
|           | 3               | 20057,7                                                   | 5243,8  | 1421,2 | 6665,0  | 26722,7 |
|           |                 | 75,1                                                      | 19,6    | 5,3    | 24,9    | 100     |
|           | 4               | 66198,0                                                   | 19336,0 | 4692,0 | 24028,0 | 90226,0 |
| 73,4      |                 | 21,4                                                      | 5,2     | 26,6   | 100     |         |

| 1                                         | 2        | 3              | 4              | 5             | 6              | 7              |
|-------------------------------------------|----------|----------------|----------------|---------------|----------------|----------------|
| <b>В среднем<br/>на всех<br/>профилях</b> | <b>1</b> | <b>2287,6</b>  | <b>209,0</b>   | <b>161,8</b>  | <b>370,8</b>   | <b>2658,3</b>  |
|                                           |          | 86,1           | 7,9            | 6,1           | 13,9           | 100            |
|                                           | <b>2</b> | <b>8304,7</b>  | <b>1683,8</b>  | <b>588,0</b>  | <b>2271,8</b>  | <b>10576,5</b> |
|                                           |          | 78,5           | 15,9           | 5,6           | 21,5           | 100            |
|                                           | <b>3</b> | <b>25792,1</b> | <b>6451,8</b>  | <b>1827,3</b> | <b>8279,1</b>  | <b>34071,2</b> |
|                                           |          | 75,7           | 18,9           | 5,4           | 24,3           | 100            |
|                                           | <b>4</b> | <b>46230,3</b> | <b>13034,1</b> | <b>3276,4</b> | <b>16310,5</b> | <b>62540,8</b> |
|                                           |          | 73,9           | 20,8           | 5,2           | 26,1           | 100            |

Данные, приведенные в табл. 7.8. позволяют отметить следующее. Общая надземная фитомасса древостоев и масса ее отдельных фракций (стволов в коре, ветвей и хвои) существенно варьируют по высотным уровням исследуемых профилей. Такое варьирование обусловлено крайней неоднородностью таксационной структуры насаждений на исследуемых объектах, связанной со спецификой локальных условий местопроизрастания. Тем не менее обнаруживается четкая зависимость накопления запасов фитомассы от высоты над уровнем моря. Так, по мере продвижения в гору (от четвертого высотного уровня к первому) запас надземной фитомассы древостоев закономерно уменьшается: на западном профиле с 48986,3 до 5531,9 кг/га (в 8,9 раза), на восточном – с 68865,6 до 1376,2 кг/га (в 50 раз), на южном – с 42085,3 до 1066,8 кг/га (в 39,4 раза), на северном (от четвертого уровня ко второму) – с 90226,0 до 4350,9 кг/га (20,7 раза). Выявляется, что увеличение фитомассы при переходе от первого уровня ко второму, а также от второго уровня к третьему выражено в значительно большей степени, чем при переходе от третьего уровня к четвертому.

Наглядное представление об этой особенности накопления надземной фитомассы древостоев в исследуемом экотоне можно получить по данным, представленным на рис. 7.4.

Характер изменения запасов фитомассы по высотным уровням на рис. 7.4 объясняется следующим. Как отмечалось выше, высотные уровни зафиксированы с учетом сомкнутости крон, которая увеличивается от первого уровня до четвертого. Причем на первом уровне (редины) и втором (редколесье) сомкнутость крон

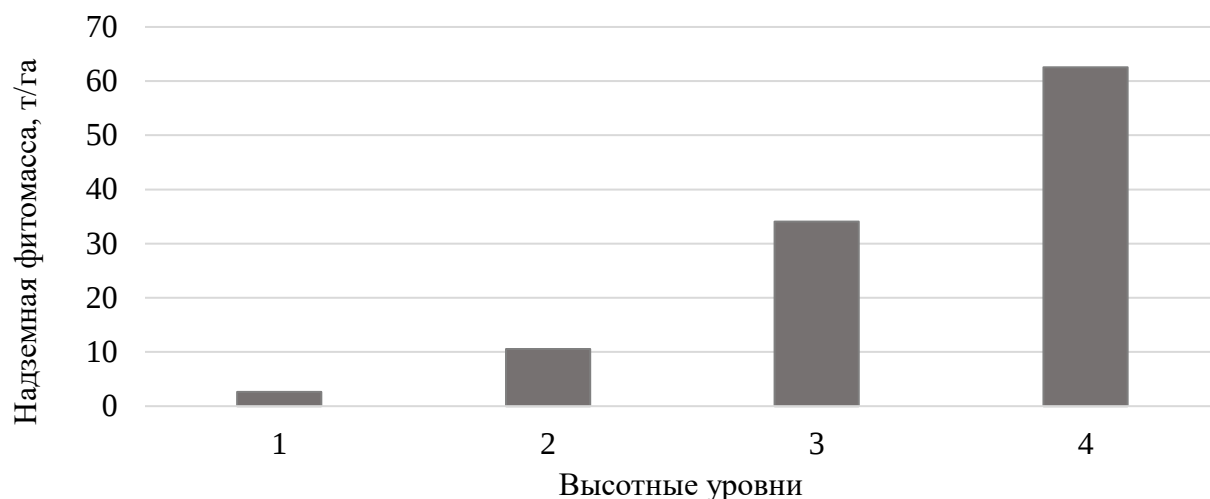


Рисунок 7.4 – Запасы надземной фитомассы древостоев на различных высотных уровнях в среднем по всем исследуемым профилям

и густота древостоев существенно ниже, чем на третьем (верхняя граница сомкнутого леса) и четвертом (сомкнутый лес) уровнях. На полных профилях со всеми четырьмя высотными уровнями (западном, восточном и южном) на каждые 10 м высоты над уровнем моря общая надземная фитомасса древостоев уменьшается в среднем на 2,0–3,1 т/га.

Анализ фракционного состава надземной фитомассы исследуемых древостоев показывает, что в ней преобладают стволы и ветви – органы, длительно аккумулирующие органическое вещество. Причем, чем выше возраст органа дерева, тем больше его доля в общем запасе фитомассы. Так, на разных высотных уровнях всех исследуемых профилей удельный вес массы стволов в среднем колеблется от 73,9 до 86,1%, ветвей – от 7,9 до 20,8%, а хвои – только от 5,2 до 6,1%. По мере повышения высоты над уровнем моря доля массы стволов и ветвей закономерно уменьшается, а доля массы хвои – увеличивается (рис. 7.5).

Аналогичные результаты о влиянии высоты над уровнем моря на соотношения фракций надземной фитомассы древостоев получены в лиственничниках Приполярного Урала (Григорьев, 2011; Гайсин, 2022). Такое положение объясняется ухудшением условий произрастания и уменьшением возраста деревьев по мере продвижения в гору.

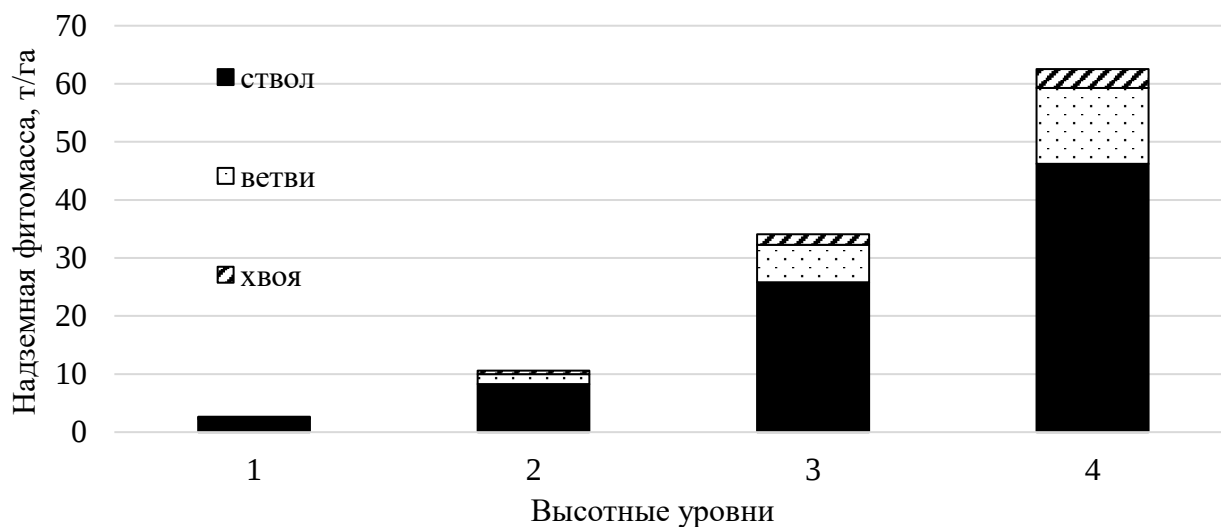


Рисунок 7.5 – Структура запасов надземной фитомассы древостоев на различных высотных уровнях в среднем по всем исследуемым профилям

Доля хвои в общей фитомассе крон древостоев в среднем по всем профилям составляет от 21,6 до 42,1%. С увеличением высоты над уровнем моря этот показатель закономерно повышается. Так, на четвертом высотном уровне она составляет 21,6, на третьем – 25,6, на втором – 30,8 и на первом – 42,1%. Увеличение охвоенности крон по мере продвижения в гору отмечается и другими исследователями (Григорьев, 2011). В специальной литературе имеются сведения о том, что для производства единицы массы древесины в худших условиях роста требуется большее количество ассимиляционного аппарата (хвои), чем в лучших (Семечкина, 1978; Усольцев, 1985; Луганский, Нагимов, 1994; Нагимов, 2000; и др.). Отмечается также, что доля хвои в фитомассе крон заметно увеличивается с уменьшением возраста древостоев, так как с возрастом наблюдается замедление отмирания нижних мутовок и постарение крон (Семечкина, 1978; Уткин и др., 1981; Луганский, Нагимов, 1994; и др.). Как отмечалось выше с повышением высоты над уровнем моря заметно ухудшаются условия роста деревьев и уменьшается их возраст. Этими обстоятельствами и объясняется, на наш взгляд, повышение охвоенности крон в направлении от четвертого высотного уровня к первому.

В целом, характер изменения соотношений фракций надземной фитомассы с изменением высотного положения древостоев логично вписывается в известные в специальной литературе положения.

В нашей стране эксплуатация лесов в качестве резервуара для стока углерода введен в ранг критериев устойчивого управления лесами (Курбанов, 2002). В научных публикациях есть сведения, что углерод депонирующий потенциал лесного покрова Российской Федерации, может принести ей большие дивиденды экологического и экономического характера (Вараксин и др., 2008).

Представленные в табл. 7.8 материалы позволяют определить запасы депонированного деревьями лиственницы углерода на единице площади на разных высотных уровнях ЭВГДР. В настоящее время запасы углерода принято оценивать на основе абсолютно сухой фитомассы растений с использованием специальных коэффициентов (Стаканов и др., 1994). Причем, большинство исследователей для определения содержания углерода в абсолютно сухой массе стволов, корней и ветвей (без листьев, хвои) применяют коэффициент 0,5 (Курбанов, 2002). Для перехода от массы зеленых органов (листьев, хвои) к запасам углерода некоторые исследователи (Birdsey, 1992) также предлагают коэффициент 0,5, а другие (Кобак, 1988) – 0,45. В целом, по данным многих исследователей содержание углерода в различных фракциях фитомассы составляет от 0,45 до 0,53 (Бобкова, Тужилкина, 2001; Кузнецов, Бобкова, 2014; и др.).

В нашей работе для определения запасов депонированного в надземной фитомассе лиственничников углерода использовались коэффициенты: 0,5 – для абсолютно сухой массы стволов и ветвей и 0,45 – для абсолютно сухой массы хвои. Результаты соответствующих расчетов представлены в табл. 7.9.

Следует отметить, что вклад лесов в компенсацию выбросов углекислого газа в атмосферу признана сегодня на международном уровне (МГЭИК, 2014). Углерод депонирующая способность фитоценозов в условиях современных изменений климата становится важной экосистемной услугой по снижению их негативных последствий (Вараксин и др., 2008; Замолодчиков и др., 2008; и др.). Полученные нами материалы могут быть использованы для оценки и прогноза био-

Таблица 7.9 – Запасы депонированного углерода в надземной фитомассе исследуемых лиственничников

| Высотные уровни            | Запасы углерода в фитомассе, кг/га |        |         |
|----------------------------|------------------------------------|--------|---------|
|                            | стволов и ветвей                   | хвои   | всего   |
| Западный профиль           |                                    |        |         |
| 1                          | 2597,4                             | 151,7  | 2749,1  |
| 2                          | 6561,4                             | 337,6  | 6899,1  |
| 3                          | 25281,5                            | 1287,7 | 26569,2 |
| 4                          | 23200,4                            | 1163,5 | 24363,9 |
| Восточный профиль          |                                    |        |         |
| 1                          | 648,0                              | 36,1   | 684,1   |
| 2                          | 5637,9                             | 292,3  | 5930,2  |
| 3                          | 14271,8                            | 736,8  | 15008,5 |
| 4                          | 32625,1                            | 1626,9 | 34252,0 |
| Южный профиль              |                                    |        |         |
| 1                          | 499,4                              | 30,6   | 530,0   |
| 2                          | 5724,0                             | 319,0  | 6043,0  |
| 3                          | 12283,9                            | 625,1  | 12909,0 |
| 4                          | 19936,4                            | 995,7  | 20932,0 |
| Северный профиль           |                                    |        |         |
| 1                          |                                    |        |         |
| 2                          | 2053,7                             | 109,6  | 2163,3  |
| 3                          | 12650,8                            | 639,5  | 13290,3 |
| 4                          | 42767,0                            | 2111,4 | 44878,4 |
| В среднем на всех профилях |                                    |        |         |
| 1                          | 1248,3                             | 72,8   | 1321,1  |
| 2                          | 4994,3                             | 264,6  | 5258,9  |
| 3                          | 16122,0                            | 822,3  | 16944,3 |
| 4                          | 29632,2                            | 1474,4 | 31106,6 |

сферной роли (в частности, углеродного бюджета) лесов, формирующихся на ранее безлесных территориях высокогорий в результате современных изменений климата.

## Выводы

Представленные в главе 7 материалы позволяют сделать следующие обобщения.

В исследуемых лиственничниках наблюдаются четкие зависимости общей надземной фитомассы деревьев и массы ее отдельных фракций (стволов в коре,

ветвей и хвои) от диаметров ствола у основания и на высоте груди, которые корректно описываются степенной (аллометрической) функцией. При оценке всех фракций надземной фитомассы использование в уравнениях в качестве определяющих факторов диаметра деревьев на высоте груди и диаметра их у основания обеспечивают примерно одинаковую точность. Причем информативность обоих показателей при оценке массы разных фракций различна. Наиболее тесно с этими показателями связана фитомасса стволов, а наименее тесно – фитомасса хвои, что объясняется разной степенью изменчивости фракций фитомассы.

С увеличением диаметра деревьев масса всех фракций надземной фитомассы закономерно возрастает ускоряющимися темпами. Выявляются четкие закономерности не только в изменении абсолютных значений компонентов фитомассы в зависимости от толщины деревьев, но и в соотношениях последних между собой. В общей надземной фитомассе у деревьев различного диаметра вес стволов составляет 63,3–82,7%, ветвей – 12,5–16,6%, а хвои – 3,2–11,7%. С увеличением толщины деревьев удельный вес стволовой массы неуклонно повышается, а кроновой (ветвей и хвои) – снижается. Такой характер динамики соотношений фракций надземной фитомассы (связанной с изменением толщины деревьев), противоположный данным, полученным в равнинных насаждениях, свидетельствует о специфических особенностях формирования надземной фитомассы деревьев в высокогорных условиях.

Зависимости общей надземной фитомассы, а также массы стволов, ветвей и хвои от показателя  $D_{1,3}^2 \cdot H$  характеризуются очень высокой теснотой (во всех случаях  $R^2 \geq 0,900$ ) и носят прямолинейный характер.

При определении запасов фитомассы древостоев регрессионным методом по общим для всех высотных уровней уравнениям, при их разработке в качестве независимой переменной более обоснованным является использование показателя  $D_{1,3}^2 \cdot H$ , а не диаметров ствола у основания или на высоте груди. Это объясняется следующими двумя обстоятельствами. Во-первых, зависимости общей надземной фитомассы и ее отдельных фракций от показателя  $D_{1,3}^2 \cdot H$  на фоне высокой тесноты носят прямолинейный характер. Во-вторых, переменная, представляющая

собой комбинацию диаметра и высоты стволов, позволяет учесть изменения соотношений между диаметрами и высотами деревьев с повышением (или понижением) высоты над уровнем моря и более точно определить их фитомассу.

Запасы фитомассы лиственных древостоев на исследуемых профилях существенно увеличиваются по мере снижения высоты над уровнем моря. Так, в среднем по всем профилям общая надземная фитомасса на четвертом высотном уровне (44,7 т/га) в 15,4 раза больше, чем на первом (2,9 т/га). Причем, увеличение фитомассы при переходе от первого уровня (редины) ко второму (редколесью), а также от второго уровня к третьему (верхняя граница сомкнутого леса) выражено в значительно большей степени, чем при переходе от третьего уровня к четвертому (сомкнутый лес). На полных профилях со всеми четырьмя высотными уровнями (западном, восточном и южном) на каждые 10 м высоты над уровнем моря общая надземная фитомасса древостоев увеличивается в среднем на 2,0–3,1 т/га.

В надземной фитомассе исследуемых древостоев преобладают стволы и ветви – органы, длительно аккумулирующие органическое вещество. Причем, чем выше возраст органа дерева, тем больше его доля в общем запасе фитомассы. Так, на разных высотных уровнях всех исследуемых профилей удельный вес массы стволов колеблется от 73,9 до 86,1%, ветвей – от 7,9 до 20,8%, а хвои – только от 5,2 до 6,1%. С повышением высоты над уровнем моря закономерно снижается доля стволовой древесины и, соответственно, повышается доля крон в целом и хвои в том числе. Охвоенность крон (доля хвои в общей фитомассе крон древостоев) в среднем по всем профилям составляет от 21,6 до 42,1%. С увеличением высоты над уровнем моря этот показатель закономерно повышается.

В целом, характер изменения соотношений фракций надземной фитомассы с изменением высотного положения древостоев логично вписывается в известные в специальной литературе положения. С повышением высоты над уровнем моря ухудшаются лесорастительные условия и снижается возраст древостоев. Повышение доли массы хвои, а, следовательно, и общей массы крон с ухудшением условий местопроизрастания и уменьшение возраста деревьев является доказан-

ным фактом. Таким образом, нами установлено принципиальное сходство полученных в ЭВГДР данных по формированию надземной фитомассы древостоев с известными в лесоводственно-таксационной литературе положениями при некотором количественном расхождении результатов.

Полученные нами материалы по запасам надземной фитомассы и депонированного углерода в исследуемых лиственничниках могут быть использованы для оценки и прогноза биосферной роли (в частности, углеродного бюджета) лесов, формирующихся на ранее безлесных территориях плато Путорана в результате современных изменений климата.

## Заключение

Результаты проведенных исследований позволяют сделать следующие основные обобщения и выводы.

В течение последнего столетия в районе плато Путорана произошло потепление и увлажнение климата. Среднегодовая температура воздуха повысилась на  $1,03^{\circ}\text{C}$ , а количество осадков возросло на 82 мм. Причем, более благоприятными для произрастания древесной растительности стали температурные условия как летнего, так и зимнего периодов.

Локальные условия местопроизрастания (приземная температура воздуха, температура почвы, глубина снежного покрова), оказывающие существенное влияние на формирование и рост древостоев, в значительной степени обусловлены экспозицией склонов и высотой над уровнем моря.

Изменения древесно-кольцевых хронологий осреднённых радиальных приростов на всех склонах имеют общие закономерности: деревья молодых поколений (до 80 лет) характеризуются ярко выраженными трендами на увеличение осредненных приростов, а более старших поколений, наоборот, отличаются трендами к уменьшению.

Средняя ШГК по всем построенным хронологиям изменяется от 0,125 до 1,003 мм. У деревьев, принадлежащих к одной возрастной группе (в которой разница в возрасте не превышает 40 лет), этот показатель в целом уменьшается со снижением высоты над уровнем моря и увеличением густоты древостоев. Устойчивые, односторонние изменения средней ШГК в связи с высотой над уровнем моря, у деревьев старших возрастных групп (возраст деревьев более 80 лет), не обнаруживаются.

По уменьшению морфологических показателей и средней ШГК деревьев первой и второй возрастных групп, склоны можно расположить в следующий ряд: южный - восточный - западный - северный. Таким образом, лучшими условиями для роста деревьев и формирования годичного прироста по радиусу, характеризуется южный склон, а худшими - северный.

На исследуемых объектах средний коэффициент чувствительности для индексированных значений ШГК изменяется в пределах от 0,40 до 0,70. Этот показатель во всех возрастных группах деревьев на исследуемых профилях имеет тенденцию к увеличению по мере снижения высоты над уровнем моря. При прочих равных условиях в старших возрастных группах деревьев он выше, чем в младших.

Значения среднего коэффициента межсерийной корреляции по всем построенным хронологиям приростов изменяются в диапазоне от 0,36 до 0,72. Наблюдается тенденция повышения этого показателя с увеличением возраста деревьев. При прочих равных условиях коэффициент межсерийной корреляции хронологий приростов у деревьев одного возраста имеет тенденцию к понижению с уменьшением высотной позиции древостоев.

Молодые поколения деревьев при одинаковом возрасте в верхних частях экотона на склонах восточной, западной и южной экспозиций отличаются более высокими значениями морфометрических показателей и ШГК, чем в его нижних частях. В этой связи можно предположить, что в условиях Субарктики важнейшим фактором для роста деревьев является количество поступающей солнечной радиации и прогреваемость стволов. Эти факторы более значимы на верхних участках экотона с более низкой сомкнутостью крон.

На всех высотных уровнях исследуемых склонов, а в пределах их во всех возрастных группах деревьев на величину индексов радиального прироста наибольшее положительное, значимое влияние оказывает средняя температура июля. Положительное влияние на формирование радиального прироста также оказывают влияние у деревьев второй возрастной группы температуры сентября и октября, третьей группы - температуры октября и ноября, а четвертой – июня. Майские температуры в большинстве случаев оказывают отрицательное влияние на прирост деревьев.

Растущие в ЭВГДР в настоящее время деревья лиственницы резко отличаются по времени появления. Процесс лесовозобновления на всех склонах очень растянут во времени, продолжительность его исчисляется столетиями. Устойчи-

вое (без разрывов), достаточно активное возобновление лиственницы на первом уровне исследуемых профилей началось в 1950-1965 годах, а на втором – в 1940-1960 годах, то есть чуть раньше. На наш взгляд, это связано с существенным улучшением климатической обстановки в последние 70-80 лет.

Формирование абсолютно разновозрастных древостоев (с разницей в возрасте групп деревьев более чем на два класса возраста) в ЭВГДР объясняется складывающимися в верхних частях склонов условиями для лесовозобновления, которые не гарантируют участие даже появившихся всходов и самосева в лесовозобновительном процессе. Только после семенных годов при определенном (относительно благоприятном) сочетании факторов внешней среды возможны выживание и успешный рост всходов и подроста. В связи с этим процесс лесовозобновления в экотоне растягивается на долгие годы и формируются разновозрастные древостои. Таким образом, разновозрастность древостоев в верхней границе леса может рассматриваться как фактор их выживаемости и устойчивости в крайне неблагоприятных лесорастительных условиях.

Различия между высотными уровнями одного и того же профиля, а также одноименными уровнями разных профилей по густоте древостоев, скорости и характеру лесовозобновления, связаны с их локальными условиями местопроизрастания. И здесь определяющее значение могут иметь особенности снегонакопления и мощность снежного покрова на исследуемых объектах, которые определяют термический режим почв зимой и их увлажнение в вегетационный период, а также степень повреждения снежной абразией верхних частей растений, оказывающихся выше уровня снега.

На всех склонах диапазон изменения возраста лиственницы увеличивается с уменьшением высотной позиции древостоев, а средние значения этого показателя уменьшаются по мере продвижения в гору: на западном профиле от 119 до 59 лет, на восточном – от 133 до 50, на северном – от 216 до 95 и на южном – от 112 до 40 лет. Эти данные являются отражением постепенного поднятия верхней границы леса в последние столетия

На всех исследованных объектах древостои лиственницы характеризуются высоким варьированием возраста деревьев. Причем, изменчивость возраста на восьми объектах соответствует очень высокому уровню (более 40%), на шести объектах - высокому (от 31 до 40%) и на одном объекте – повышенному уровню (от 21 до 30%). При прочих равных условиях коэффициенты изменчивости возраста деревьев в исследуемых древостоях существенно выше, чем приводимые в специальной литературе для отдельных элементов (поколений) леса.

По абсолютным значениям показателей асимметрии и эксцесса можно констатировать, что эмпирические ряды распределения деревьев по возрасту в подавляющем большинстве случаев существенно отличаются от нормального распределения Гаусса-Лапласа. Влияние высоты над уровнем моря на крутость и косость рядов не обнаруживается.

В соответствии с обобщенной схемой типов возрастной структуры древостоев Г.Е. Комина и И.В. Семечкина, в исследуемом ЭВГДР наибольшее распространение имеют циклично разновозрастные и ступенчато разновозрастные древостои, состоящие из нескольких морфологически невыраженных поколений леса.

С учетом крайне низких показателей роста и не выраженности возрастных поколений леса в насаждениях, сформировавшихся в ЭВГДР, при их таксации, целесообразна синтетическая оценка всего разновозрастного древостоя, но в пределах выделяемых высотных уровней.

Исследуемые древостои лиственницы (совокупности крайне разновозрастных деревьев) отличаются значительным диапазоном изменения таксационных показателей деревьев – диаметра и высоты. Изменчивость диаметра стволов лиственницы на исследуемых объектах соответствует высокому и очень высокому уровню, а высот – повышенному, высокому и очень высокому. При прочих равных условиях коэффициенты изменчивости этих показателей в исследуемых древостоях в среднем в 1,3 -1,9 раза выше, чем в отдельно взятых элементах леса. Чрезвычайно высокая изменчивость диаметра и высоты стволов в лиственничниках, в первую очередь связана их высокой разновозрастностью. Определенное

влияние на размах рядов распределения деревьев по диаметру и высоте, концентрацию числа стволов по ступеням этих показателей, величину асимметрии и эксцесса рядов оказывает высота над уровнем моря.

Древостои имеют очень низкую производительность и характеризуются, как правило, Vб классом бонитета. Средние значения диаметра и высоты деревьев лиственницы на склонах любой экспозиции закономерно уменьшаются с повышением высоты над уровнем моря. Это связано снижением в этом направлении среднего возраста деревьев и ухудшением лесорастительных условий.

Лиственничники характеризуются крайне низкими значениями среднего общего прироста по диаметру и высоте. Наибольшими значениями этих показателей характеризуются древостои на южном, наиболее инсолируемом склоне, в которых прирост по диаметру по высотным уровням колеблется от 0,90 мм до 1,34 мм, а прирост по высоте - от 6,6 см до 8,3 см. Некоторое превосходство южного склона над остальными по величине среднего общего прироста по диаметру и высоте объясняется более благоприятными микроклиматическими условиями и сравнительно низким возрастом древостоев на данном склоне.

На каждом склоне проявляется тенденция увеличения среднего прироста по диаметру и высоте по мере снижения высотного положения древостоев, несмотря на увеличение в этом направлении их среднего возраста.

В древостоях, независимо от их высотного положения, наблюдаются устойчивые, в большинстве случаев, тесные связи между таксационными показателями стволов и крон, в частности, между диаметром и высотой стволов, а также - между диаметром стволов и диаметром крон. Зависимость высоты деревьев от их диаметра на верхних высотных уровнях прямолинейна. Прямая пропорциональность между данными показателями нарушается по мере перехода от верхних высотных уровней к нижним, что объясняется усилением конкуренции между деревьями в этом направлении в результате повышения полноты и сомкнутости древостоев.

На количественные соотношения диаметров и высот деревьев определенное влияние оказывает высота над уровнем моря - наблюдается тенденция увеличения

высоты у деревьев одинаковой толщины по мере ее снижения. Таким образом, по мере продвижения вниз по склону улучшаются условия для роста лиственницы в высоту и меняется разряд высоты древостоев.

Зависимость диаметра крон от диаметра стволов описывается уравнением прямой. При повышении высоты над уровнем моря у деревьев одинаковой толщины диаметр крон увеличивается, что в первую очередь объясняется улучшением рангового положения деревьев одинаковой толщины по мере продвижения вверх по склону. Отношение диаметра крон (в м) к диаметру ствола (в см) в целом по всем профилям в среднем составляет: для первого высотного уровня 0,38, для второго – 0,31, для третьего – 0,25 и для четвертого – 0,18. Эти данные могут быть использованы как коэффициенты для приближенной оценки диаметров крон деревьев по диаметрам стволов.

Диаметр стволов лиственницы закономерно увеличивается при одинаковой высоте деревьев с увеличением их диаметра крон, а при фиксированных значениях диаметра крон - с увеличением высоты. Разработанное двухфакторное уравнение по оценке диаметра стволов, включающем в качестве определяющих факторов высоту стволов и диаметр крон, позволяет с достаточной точностью определить диаметр стволов по измеренным на аэрофотоснимках высотам деревьев и диаметрам их крон.

Исследуемые разновозрастные древостои, произрастающие на склонах той или иной экспозиции, а в пределах склонов – на разных высотных уровнях, характеризуются значительно большим диапазоном изменчивости таксационных показателей деревьев и меньшей теснотой связей между ними, чем отдельные элементы и поколения леса. Однако в них сохраняются закономерности строения древостоев по таксационным признакам, присущие элементам (поколениям) леса. Данное обстоятельство с биологических позиций характеризует их как сформировавшиеся природные объекты и указывает на возможность синтетической оценки разновозрастных древостоев, но в пределах выделяемых высотных уровней, на которых они представляют собой самостоятельные статистические совокупности. По результатам проведенной работы при лесоучетных работах высотные уровни

целесообразно обосновывать в увязке с подпоясами ЭВГДР (отдельных деревьев, редин, редколесий), выделяемых П.Л. Горчаковским и С.Г. Шиятовым (1985).

Высокая гетерогенность строения древостоев является показателем их фитоценотической устойчивости. Поэтому есть основание констатировать, что формирующиеся в результате потепления климата на ранее безлесных территориях (горной тундре) насаждения в обозримом будущем способны поддерживать свое жизненное состояние и успешно выполнять в экстремальных условиях высокогорий важнейшие биосферные и экологические функции.

В исследуемых лиственничниках наблюдаются четкие зависимости общей надземной фитомассы деревьев и массы ее отдельных фракций (стволов в коре, ветвей и хвои) от диаметров ствола у основания и на высоте груди, которые корректно описываются степенной (аллометрической) функцией. Причем информативность обоих показателей при оценке массы разных фракций различна. Наиболее тесно с этими показателями связана фитомасса стволов, а наименее тесно – фитомасса хвои, что объясняется разной степенью изменчивости фракций фитомассы.

С увеличением диаметра деревьев масса всех фракций надземной фитомассы закономерно возрастает ускоряющимися темпами. Выявляются четкие закономерности не только в изменении абсолютных значений компонентов фитомассы в зависимости от толщины деревьев, но и в соотношениях последних между собой. В общей надземной фитомассе у деревьев различного диаметра вес стволов составляет 63,3-82,7%, ветвей - 12,5-16,6%, а хвои - 3,2-11,7%. С увеличением толщины деревьев удельный вес стволовой массы неуклонно повышается, а кроновой (ветвей и хвои) - снижается.

При определении запасов фитомассы древостоев регрессионным методом по общим для всех высотных уровней уравнениям, при их разработке в качестве независимой переменной более обоснованным является использование показателя  $d_{1,3}^2 \cdot h$ , а не диаметров ствола у основания или на высоте груди. Это объясняется следующими двумя обстоятельствами. Во-первых, зависимости общей надземной фитомассы и ее отдельных фракций от показателя  $d_{1,3}^2 \cdot h$  на фоне высокой тесно-

ты (во всех случаях  $R^2 \geq 0,900$ ) носят прямолинейный характер. Во-вторых, переменная, представляющая собой комбинацию диаметра и высоты стволов, позволяет учесть изменения соотношений между диаметрами и высотами деревьев с повышением (или понижением) высоты над уровнем моря и более точно определить их фитомассу.

Запасы фитомассы лиственных древостоев на исследуемых профилях существенно увеличиваются по мере снижения высоты над уровнем моря. Так, в среднем по всем профилям общая надземная фитомасса на четвертом высотном уровне (44,7 т/га) в 15,4 раза больше, чем на первом (2,9 т/га). В целом на каждые 10 м высоты над уровнем моря общая надземная фитомасса древостоев увеличивается в среднем на 2,0-3,1 т/га.

В надземной фитомассе исследуемых древостоев преобладают стволы и ветви – органы, длительно аккумулирующие органическое вещество. Причем, чем выше возраст органа дерева, тем больше его доля в общем запасе фитомассы. Так, на разных высотных уровнях всех исследуемых профилей удельный вес массы стволов колеблется от 73,9 до 86,1%, ветвей – от 7,9 до 20,8%, а хвои – только от 5,2 до 6,1%. С повышением высоты над уровнем моря закономерно снижается доля стволовой древесины и, соответственно, повышается доля крон в целом и хвои в том числе. Охвоенность крон (доля хвои в общей фитомассе крон древостоев) в среднем по всем профилям составляет от 21,6 до 42,1%. С увеличением высоты над уровнем моря этот показатель закономерно повышается.

В целом, характер изменения соотношений фракций надземной фитомассы с изменением высотного положения древостоев логично вписывается в известные в специальной литературе положения. С повышением высоты над уровнем моря ухудшаются лесорастительные условия и снижается возраст древостоев. Повышение доли массы хвои, а, следовательно, и общей массы крон с ухудшением условий местопроизрастания и уменьшение возраста деревьев является доказанным фактом. Таким образом, нами установлено принципиальное сходство полученных в ЭВГДР данных по формированию надземной фитомассы древостоев с

известными в лесоводственно-таксационной литературе положениями при некотором количественном расхождении результатов.

Полученные нами материалы по запасам надземной фитомассы и депонированного углерода в исследуемых лиственничниках могут быть использованы для оценки и прогноза биосферной роли (в частности, углеродного бюджета) лесов, формирующихся на ранее безлесных территориях плато Путорана в результате современных изменений климата.

### Список литературы

Абаимов, А.П. Особенности формирования и функционирования лиственных лесов на мерзлотных почвах / А.П. Абаимов, С.Г. Прокушкин, О.А. Зырянова, Л.Н. Каверзина // Лесоведение. – 1997. – № 5. – С. 13-23.

Алисов, Б.П. Климат СССР / Б.П. Алисов. – Москва: Изд-во Моск. ун-та, 1956. – 127 с.

Андреев, С.Г. Региональные закономерности изменчивости прироста сосны в степной зоне Бурятии / С.Г. Андреев, А.К. Тулохонов, М.М. Наурзбаев // География и природные ресурсы. – 2001. – № 1. – С. 73-78.

Анисимов, О.А. Оценка критических уровней воздействия изменения климата на природные экосистемы суши на территории России / О.А. Анисимов, Е.Л. Жильцова, С.А. Ренева // Метеорология и гидрология. – 2011. – № 12. – С. 31-41.

Анучин, В.П. Лесная таксация: учебник для лесных вузов. – 5-е изд., доп. – М.: Лесн. пром-сть, 1982. – 552 с.

Аткин, А.С. Закономерности формирования органической массы в лесных сообществах: автореф. дис...канд. с.-х. наук. 06.03.03 / Аткин Александр Семёнович – Екатеринбург, 1994. – 40 с.

Ахромейко, А.И. Бузулукский бор: Физиологическое обоснование развития сосны в степях / А.И. Ахромейко. – М., Л.: Гослесбумиздат, 1950. – 264 с.

Бабенко, Т.С. Закономерности роста деревьев и древостоев ели сибирской в высокогорьях Южного Урала (на примере г. Малый Ирмель): автореф. дис...канд. с.-х. наук: 06.03.02 / Бабенко Татьяна Сергеевна. – Екатеринбург, 2006. – 23 с.

Бартыш, А.А. Закономерности формирования древостоев на верхней границе леса в условиях современного изменения климата (на примере Тылайско-Конжаковско-Серебрянского горного массива): автореф. дис...канд. с.-х. наук: 06.03.02 / Бартыш Александр Александрович. – Екатеринбург, 2008. – 23 с.

Белых, Ф.И. Озеро Лама и его рыбохозяйственное использование / Ф.И. Белых // Тр. Ин-та полярн. землед., животноводства и промысл. х-ва. Сер. Промысловое х-во. – 1940. – № 11. – С. 73-100.

Бенькова, В.Е. Значение микроэкологических условий для роста лиственницы Гмелина в экотоне верхней границы леса на полуострове Таймыр / В.Е. Бенькова, А.В. Шашкин, М.М. Наурзбаев [и др.] // Лесоведение. – 2012. – № 4. – С. 73-84.

Бенькова, А.В. Значение экспозиции склонов для роста лиственницы Гмелина в мерзлотных условиях Средней Сибири I. Различия в динамике радиального прироста деревьев на склонах северной и южной экспозиции / А.В. Бенькова, Д.А. Машуков, В.Е. Бенькова [и др.] // Сибирский лесной журнал. – 2015. – № 4. – С. 18-29.

Биологическая продуктивность лесов Поволжья / А.И. Уткин, В.В. Осипов, Л.С. Ермолова [и др.]. – Москва: Наука, 1982. – 282 с.

Бобкова, К.С. Содержание углерода и калорийность органического вещества в лесных экосистемах Севера / К.С. Бобкова, В.В. Тужилкина // Экология. – 2001. – № 1. – С. 69-74.

Богословская, О.А. Запасы углерода в насаждениях некоторых экотонов и на лесопокрытых площадях Уральского региона: автореф. дис...канд. с.-х. наук: 06.03.02 / Богословская Ольга Анатольевна. – Екатеринбург, 2005. – 22 с.

Будыко, М.И. Современное изменение климата // Проблемы современной гидрологии / М.И. Будыко, К.Я. Винников, Г.В. Менжулин. – Л.: Гидрометеиздат, 1989. – С. 108-124.

Ваганов, Е.А. Дендроклиматические исследования в Урало-Сибирской Субарктике / Е.А. Ваганов, С.Г. Шиятов, В.С. Мазепа. – Новосибирск: Наука, 1996. – 248 с.

Ваганов, Е.А. Дендрохронологические методы в изучении среды голоцена и плейстоцена Сибири / Е.А. Ваганов, С.Г. Шиятов. – Новосибирск, 1998. – С 56-64.

Ваганов, Е.А. Рост и структура годовичных колец хвойных / Е.А. Ваганов, А.В. Шашкин. – Новосибирск: Наука, 2000. – 232 с.

Вагин, А.В. Лесная таксация и лесоустройство / А.В. Вагин, Е.С. Мурахтанов, А.И. Ушаков, О.А. Харин. – Москва: Лесн. пром-сть, 1978. – 367 с.

Вараксин, Г.С. Биологическая продуктивность сосны обыкновенной в Средней Сибири / Г.С. Вараксин, В.И. Поляков, М.А. Люминарская // Лесоведение. – 2008. – №3. – С. 14-19.

Ватковский, О.С. Фитомасса солонцовых дубрав / О.С. Ватковский // Лесоведение. – 1969. – №1. – С. 90-95.

Вернодубенко, В.С. Динамика хвойных древостоев на торфяных почвах Европейского Севера: автореферат дис. ...канд. с.-х. наук: 06.03.02 / Вернодубенко Владимир Сергеевич. – Архангельск, 2011. – 20 с.

Вертикально-фракционное распределение фитомассы в лесах / А.И. Уткин, Н.А. Ильина, С.Г. Рождественский [и др.]. – Москва: Наука, 1986. – 260 с.

Верхунов, П.М. Закономерности строения разновозрастных сосняков / П.М. Верхунов. – Новосибирск: Наука, 1976. – 234 с.

Верхунов, П.М. Таксация леса: учебное пособие / П.М. Верхунов, В.Л. Черных. – Йошкар-Ола: Марийский государственный технический университет, 2009. – 396 с.

Воробьев, О.Н. Структура, пространственное распределение и депонирование углерода в древесном детрите сосняков Марийского Заволжья: автореф. дис...канд. с.-х. наук: 06.03.02 / Воробьев Олег Николаевич. – Йошкар-Ола, 2006. – 23 с.

Воронов, П.С. О связи конфигурации гидросети Севера Сибири с новейшей тектоникой / П.С. Воронов, Ю.Н. Кулаков // Информ. Бюл. НИИГА. – 1958. – №. 9. – С. 47-52.

Высоцкий, К.К. Закономерности строения смешанных древостоев / К.К. Высоцкий. – М.: Гослесбумиздат, 1962. – 176 с.

Гайсин, И.К. Экспансия древесной растительности в экотоне лес–горная степь на Южном Урале в связи с изменениями климата и влажности местообитаний / И.К. Гайсин, П.А. Моисеев, И.И. Махмутова, Н.Ф. Низаметдинов, О.О. Моисеева // Экология. – 2020. – №4. – С. 251-264.

Гайсин, И.К. Пространственно-временная динамика древесной растительности в экотоне лес–горная степь массива Крака (Южный Урал) в связи с изменени-

ями климата: автореф. дис... канд. биол. наук: 06.03.02 / Гайсин Ильдар Кадирович. – Екатеринбург, 2022. – 20 с.

Галазий, Г.И. Дендрошкалы Прибайкалья и плато Путорана / Г.И. Галазий // Дендроклиматологические шкалы Советского Союза. – Каунас, 1981. – Ч.2. – С. 31-38.

Горчаковский, П.Л. Закономерности снегонакопления в горах Северного Урала и водоохранная роль высокогорных лесов / П.Л. Горчаковский // Тр. Уральск. Лесотехн. Инст. – 1959. – № 16. – С. 115-133.

Горчаковский, П.Л. Растительный мир высокогорного Урала / П.Л. Горчаковский. – М.: Наука, 1975. – 283 с.

Горчаковский, П.Л. Фитоиндикация снежного покрова и снежных лавин в высокогорьях / П.Л. Горчаковский, С.Г. Шиятов // Экология. – 1971. – № 1. – С. 22-35.

Горчаковский, П.Л. Сезонная ритмика растительных сообществ горных тундр Урала / П.Л. Горчаковский, И.К. Булатова // Экология. – 1979. – № 4. – С. 16-23.

Горчаковский, П.Л. Фитоиндикация условий среды и природных процессов в высокогорьях / П.Л. Горчаковский, С.Г. Шиятов. – М.: Наука, 1985. – 208 с.

Горяева, А.В. Оценка естественного возобновления ели сибирской и лиственницы сибирской на верхнем пределе их произрастания в высокогорьях Урала: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук: 06.03.03 / Горяева Алена Викторовна. – Екатеринбург, 2008. – 24 с.

Горячев, В.М. О связи текущего радиального прироста с морфометрическими характеристиками древостоев в темнохвойных лесах / В.М. Горячев // Восстановительная и возрастная динамика таежных лесов Среднего Урала. – Свердловск, 1987. – С. 143-153.

Григорьев, А.А. Формирование древостоев лиственницы и березы в высокогорьях Приполярного Урала в условиях современного изменения климата: автореф. дис...канд. с.-х. наук: 06.03.02 / Григорьев Андрей Андреевич. – Екатеринбург, 2011. – 23 с.

Гусев, И.И. Научные основы таксации еловых древостоев Европейского Севера: автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук: 06.03.02 / Гусев Иван Иванович. – Москва, 1978. – 37 с.

Данилин, М.А. Осиновые леса Сибири: автореф. дис...д-ра. с.-х. наук: 06.03.03 / Данилин Михаил Андреевич. – Красноярск, 1989. – 44 с.

Данилов, М.Д. Изменение веса и влажности хвои сосны обыкновенной в связи с собственным возрастом и возрастом дерева / М.Д. Данилов // Докл. АН СССР. – 1948. – Т.59, №8. – С. 375-378.

Дворецкий, М.Л. Пособие по вариационной статистике для лесохозяйственников / М.Л. Дворецкий. – Москва: Лесная промышленность, 1971. – 104 с.

Деменев, В.В. Продуктивность и структура надземной фитомассы сосны Среднего Урала: автореф. дис...канд. с.-х. наук: 06.03.03 / Деменев Владимир Владимирович. – Екатеринбург, 1995. – 20 с.

Дэви, Н.М. Морфогенез лиственницы сибирской в связи с современным изменением климата в высокогорьях Полярного Урала: автореф. дис... канд. биол. наук: 03.00.16 / Дэви Надежда Михайловна. – Екатеринбург, 2008. – 22 с.

Загреев, В.В. Общесоюзные нормативы для таксации лесов / В.В. Загреев, В.И. Сухих, А.З. Швиденко, Н.Н. Гусев, А.Г. Мошкалев. – Москва: Колос, 1992. – 495 с.

Замолотчиков, Д.Г. Оценка и прогноз углеродного бюджета лесов Вологодской области по канадской модели CBM-CFS / Д.Г. Замолотчиков, В.И. Грабовский, Г.Н. Коровин, В.А. Курц // Лесоведение. – 2008. – №6. – С. 3-14.

Замолотчиков, Д.Г. Лес и климат / Д.Г. Замолотчиков, К.К. Кобяков, А.О. Кокорин, А.А. Алейников, Н.М. Шматков. – М.: Всемирный фонд дикой природы (WWF), 2015. – 40 с.

Зиганшин, Р.А. Мониторинг лесных экосистем Таймыра / Р.А. Зиганшин, В.И. Воронин, Ю.М. Карбаинов // Вестник КрасГАУ. – 2011. – № 8. – С. 117-123.

Иванчиков, А.А. Биологическая и хозяйственная продуктивность сосняков Карелии / А.А. Иванчиков // Лесные растительные ресурсы Южной Карелии. – Петрозаводск, 1971. – С. 78-85.

Иванов, М.К. Тектоно-магматическое и прогнозное районирование никеленосных сибирских траппов // Петрологические особенности и прогнозное районирование никеленосных трапповых полей севера Красноярского края. – Л.: Недра, 1983. – С. 115-133.

Игнатенко, И.В. Почвы восточноевропейской тундры и лесотундры / И.В. Игнатенко. – М.: Наука, 1979. – 279 с.

Изменение климата, 2001 г. Обобщенный доклад. Вклад рабочих групп I, II, III в подготовку Третьего доклада об оценке Межправительственной группы экспертов по изменению климата / Под ред. Р. Т. Уотсона. – Женева, 2003. – 220 с.

Им, С.Т. Климатически индуцированные изменения в экотоне альпийской лесотундры плато Путорана / С.Т. Им, В.И. Харук // Исследование земли из космоса. – 2013. – № 5. – С. 32-44.

Капралов, Д.С. Изменения в составе, структуре и высотном положении мелколесий на верхнем пределе их произрастания в горах Северного Урала / Д.С. Капралов, С.Г. Шиятов, П.А. Моисеев, В.В. Фомин // Экология. – 2006. – Т. 37, № 6. – С. 403-410.

Капралов, Д.С. Пространственно-временная динамика верхней границы леса на Южном Урале / Д.С. Капралов, С.Г. Шиятов, В.В. Фомин, Ю.В. Шалаумова // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. – 2007. – № 180. – С. 59-68.

Классификация и диагностика почв СССР. – М.: Колос, 1977. – 223 с.

Кнорре, А.А. Изменчивость видового разнообразия и надземной биомассы вдоль высотного трансекта северо-западной оконечности плато Путорана / А.А. Кнорре, А.В. Кирдянов, Е.В. Федотова, М.М. Наурзбаев // География и природные ресурсы. – 2006. – № 3. – С. 75-81.

Кобак, К.И. Биотические компоненты углеродного цикла / К.И. Кобак. – Л.: Гидрометеиздат, 1988. – 246 с.

Коссович, Н.Л. Влияние рубок ухода на ассимиляцию, освещение и прирост ели в елово-лиственном молодняке / Н.Л. Коссович // Рубки ухода за лесом. – Л., 1940. – С. 32-37.

Комин, Г.Е. К вопросу о типах возрастной структуры насаждений / Г. Е. Комин // Лесной журнал. – 1963. – № 3. – С. 37-42.

Комин, Г.Е. Возрастная структура древостоев и принципы ее типизации / Г. Е. Комин, И.В. Семечкин // Лесоведение. – 1970. – № 2. – С. 24-33.

Комин, Г.Е. Методика дендрохронологической оценки влияния парникового эффекта на рост леса / Г.Е. Комин // Лесоведение. – 2003. – № 1. – С. 58–64.

Кошкина, Н.Б. Начальные этапы возобновления древесных видов на верхнем пределе их произрастания в горах Урала: автореф. дис. ... канд. биол. наук: 03.00.16 / Кошкина Наталья Борисовна. – Екатеринбург, 2008. - 24 с.

Куваев, В.Б. Высотное распределение растений в горах Путорана / В.Б. Куваев. – Л.: Наука, 1980. – 262 с.

Кузнецов, М.А. Потоки органического углерода в системе почва–фитоценоз ельника чернично-сфагнового средней тайги Республики Коми / М.А. Кузнецов, К.С. Бобкова // Экология. – 2014. – № 5. – С. 338-345.

Кузьмичев, В.В. Закономерности роста древостоев / В.В. Кузьмичев. – Новосибирск: Наука, 1977. – 160 с.

Кукарских, В.В. Влияние климатических факторов на радиальный прирост сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в лесостепной зонах Южного Урала: автореф. дис... канд. биол. наук: 03.00.16 / Кукарских Владимир Витальевич. – Екатеринбург, 2009. – 22 с.

Курбанов, Э.А. Бюджет углерода сосновых экосистем Волго-Вятского района России / Э.А. Курбанов. – Йошкар-Ола: МарГТУ, 2002. – 300 с.

Лесоустроительная инструкция: утверждена приказом Минприроды России от 5 августа 2022 года № 510: зарегистрирована в Министерстве юстиции Российской Федерации 30 сентября 2022 года, регистрационный № 70328. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/351878696>.

Лобковский, В.А. Экологическая ситуация в районе расположения предприятий заполярного филиала ПАО «ГМК «Норильский никель»: современное состояние и прогноз / В.А. Лобковский, Л.Г. Лобковская // Проблемы региональной экологии. – 2015. – № 5. – С. 40-43.

Луганский, Н.А. Березняки Среднего Урала / Н.А. Луганский, Л.А. Лысов. – Свердловск: УЛТИ, 1991. – 100 с.

Луганский, Н.А. Структура и динамика сосновых древостоев на Среднем Урале / Н.А. Луганский, З.Я. Нагимов. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 1994. – 140 с.

Луганская, В.Д. Надземная биомасса сосновых молодняков на Среднем Урале / В.Д. Луганская, Н.А. Луганский // Леса Урала и хозяйство в них. – Свердловск, 1970. – Вып. 4. – С. 69-90.

Мазепа, В.С. Влияние осадков на динамику радиального прироста хвойных в субарктических районах Евразии / В.С. Мазепа // Лесоведение. – 1999. – № 6. – С. 14-21.

Макеев, О.В. О роде дерново-лесных почв на элюво-делювии траппов / О.В. Макеев, Н.А. Ногина // Почвоведение. – 1958. – № 7. – С. 86-97.

Максимов, С.В. Потенциальная продуктивность фитомассы культур сосны обыкновенной и ее география (на примере Северной Евразии): автореф. дис...канд. с.-х. наук: 06.03.03 / Максимов Сергей Викторович. – Екатеринбург, 2003. – 22 с.

Мамонов, Д.Н. Структура и динамика фитомассы сосняков Иркутской области: автореф. дис...канд. с.-х. наук: 03.00.16 / Мамонов Дмитрий Николаевич. – Воронеж, 1991. – 24 с.

Мамаев, С.А. Формы внутривидовой изменчивости древесных растений / С.А. Мамаев. – М.: Наука, 1973. – 284 с.

Манов, А.В. Климатический сигнал в древесно-кольцевых хронологиях лиственницы на западном макросклоне Приполярного Урала / А.В. Манов, С.В. Загирова // Известия РАН. Серия географическая. – 2015. – № 4. – С. 70-79.

Матвеев, С.М. Дендроиндикация динамики состояния сосновых насаждений Центральной лесостепи / С.М. Матвеев. – Воронеж: Изд-во ВГУ, 2003. – 272 с.

Матвеев, С.М. Лесоводственный и дендроклиматический анализ состояния насаждений лиственницы Гмелина западной части плато Путорана / С.М. Матвеев, Д.И. Гупалов // Лесотехнический журнал. – 2015. – Т. 5, № 3. – С. 54-65.

Машуков, Д.А. Различия в динамике роста лиственницы Гмелина на склонах северной и южной экспозиции северной тайги Центральной Эвенкии / Д.А. Машуков, А.В. Бенькова // Вестник КрасГАУ. – 2014. – № 3. – С. 129-135.

Машуков, Д.А. Значение экспозиции склонов для роста лиственницы Гмелина в мерзлотных условиях Средней Сибири. II. Особенности радиального роста на разной высоте стволов / Д.А. Машуков, А.В. Бенькова, В.Е. Бенькова [и др.] // Сибирский лесной журнал. – 2018. – № 3. – С. 11-20.

МГЭИК, 2014. Изменение климата, 2014 г.: Обобщающий доклад. Вклад Рабочих групп I, II и III в Пятый оценочный доклад Межправительственной группы экспертов по изменению климата / Под ред. Р.К. Пачаури, Л.А. Мейер. – Женева: МГЭИК. – 41 с.

Мельникова, И.В. Элементы биологической продуктивности сосняков Среднего Урала: автореф. дис...канд. с.-х. наук: 06.03.03 / Мельникова Ирина Владимировна. – Екатеринбург, 1993. – 22 с.

Митропольский, А.К. Элементы математической статистики / А.К. Митропольский. – Ленинград: ЛТА, 1969. – 274 с.

Михайлов, Н.И. Геоморфологические наблюдения в западной части гор Путорана // Вопросы географии. – М.: ОГИЗ, 1947. – № 3. – С. 7-26.

Моисеев, П.А. Структура и динамика древесной растительности на верхнем пределе ее произрастания на Урале: автореф. дис. ... д-ра биол. наук: 03.00.16 / Моисеев Павел Александрович. – Екатеринбург, 2011. – 42 с.

Мухамедшин, К.Д. Разновозрастной и пространственной структуре и строении древостоев арчи Тянь-Шаня / К.Д. Мухамедшин, Б.Н. Шамшиев // Вестник Московского государственного университета леса - Лесной вестник. – 2005. – № 6. – С. 26-28.

Нагимов, З.Я. Закономерности строения и роста сосновых древостоев и особенности рубок ухода в них на Среднем Урале: автореф. дис...канд. с.-х. наук: 06.03.03 / Нагимов Зуфар Ягфарович. – Свердловск, 1984. – 20 с.

Нагимов, З.Я. Возраст крон деревьев и его применение при оценке фитомассы крон в сосняках Среднего Урала / З.Я. Нагимов, И.С. Сальникова // Лесная таксация и лесоустройство: Межвуз. сб. науч. тр. – Красноярск, 1997. – С.48-55.

Нагимов, З.Я. Разработка унифицированных нормативов оценки надземной фитомассы деревьев / З.Я. Нагимов, И.С. Сальникова // Леса Урала и хозяйства в них. – Екатеринбург, 1998. – Вып. 20. – С. 251-262.

Нагимов, З.Я. Закономерности роста и формирования надземной фитомассы сосновых древостоев: автореф. дис. д-ра с.-х. наук: 06.03.03 / Нагимов Зуфар Ягфарович. – Екатеринбург, 2000. – 40 с.

Нагимов, З.Я. Особенности роста и формирования фитомассы древостоев ели в высокогорьях Южного Урала (на примере г. Малый Ирмель) / З.Я. Нагимов, Т.С. Бабенко, И.Г. Шевченко [и др.] // Хвойные бореальные зоны. – 2007. – Т. 24, № 4. – С. 427-429.

Нагимов, З.Я. Структура и фитомасса березовых древостоев на верхней границе леса в условиях Северного Урала / З.Я. Нагимов, П.А. Моисеев, А.А. Бартыш [и др.] // Вестник Московского государственного университета леса - Лесной вестник. – 2008. – № 3. – С. 61-67.

Наурзбаев, М.М. Изменчивость приземной температуры воздуха на севере Евразии по данным тысячелетних древесно-кольцевых хронологи / М.М. Наурзбаев, Е.А. Ваганов, О.В. Сидорова // Криосфера Земли. – 2003. – Т. 7, № 2. – С. 84-91.

Неволин, О.А. О корреляции диаметров крон с диаметрами деревьев в смешанных сосново – березовых древостоях / О.А. Неволин // Лесной журнал. – 1967. – № 1. – С. 27-30.

Никитин, К.Е. Лиственница на Украине / К.Е. Никитин. – Киев: Урожай, 1966. – 331 с.

Никитин, К.Е. Методы и техника обработки лесоводственной информации / К.Е. Никитин, А.З. Швиденко. – Москва: Лесн. пром-сть, 1978. – 272 с.

Новенко, Е.Ю. Изменения природных условий западной части плато Путорана за последние 4000 лет / Е.Ю. Новенко, Н.Г. Мазей, Д.А. Куприянов [и др.] // Вестник Московского университета. Серия 5. География. – 2022. – № 1. – С. 152-156.

Норин, Б.Н. Горные фитоценоотические системы Субарктики / Б.Н. Норин. – Ленинград: Наука, 1986. – 292 с.

Норицина, Ю.В. Биологическая продуктивность березы в связи с происхождением и географией насаждений: автореф. дис... канд. с.-х. наук: 06.03.03 / Норицина Юлия Владимировна. – Екатеринбург, 2009. – 23 с.

Поздняков, Л.К. Элементы биологической продуктивности светлохвойных лесов Якутии / Л.К. Поздняков // Лесоведение. – 1967. – № 6. – С. 36-42.

Пармузин, Ю.П. Инверсия лесной растительности в горах Путорана / Ю.П. Пармузин // Ботанический журнал. – 1959. – Т. 44, №9. – С. 1303-1307.

Пармузин, Ю.П. Ландшафтные исследования гор Путорана в палеогеографических целях / Ю.П. Пармузин // Методы географических исследований. – Москва: Географгиз, 1960. – С. 304-315.

Пармузин, Ю.П. Средняя Сибирь. Очерк природы / Ю.П. Пармузин. – М., 1964. – 310 с.

Пармузин, Ю.П. Современные рельефообразующие процессы и генезис озёрных котловин / Ю.П. Пармузин // Путоранская озёрная провинция. – Новосибирск: Наука, 1975. – Гл. 5. – С. 64-97.

Поздняков, Л.К. Мерзлотное лесоведение / Л.К. Поздняков. – Новосибирск: Наука. Сибирское отделение, 1986. – 192 с.

Попов, Е.А. Водный режим рек и озёр Норильского района / Е.А. Попов // Путоранская озёрная провинция. – Новосибирск: Наука, 1975. – Гл. 3. – С. 32-56.

Рапута, В.Ф. Оценка выбросов диоксида серы в атмосферу Норильского промышленного района / В.Ф. Рапута, Д.В. Имоненков, Б.Д. Белан, Т.В. Ярославцева // Оптика атмосферы и океана. – 2019. – Т. 32, № 6. – С. 465-470.

Рахманов, И.В. Структура фитомассы еловых древостоев в экотоне верхней границы леса в связи с глобальным потеплением климата (горный массив Ирмель, Южный Урал) / И.В. Рахманов, И.Г. Шевченко, А.А. Фастовец, З.Я. Нагимов // Материалы II Всероссийской научно-техн. конф. студентов и аспирантов. – Екатеринбург: УГЛТУ, 2006. – С. 74-75.

Сальников, А.А. Продуктивность и структура надземной фитомассы березняков на Урале: автореф. дис...канд. с.-х. наук: 06.03.03 / Сальников Александр Александрович. – Екатеринбург, 1997. – 24 с.

Свалов, Н.Н. Вариационная статистика: учебное пособие для вузов / Н.Н. Свалов. – Москва: Лесн. пром-ть, 1977. – 176 с.

Семечкин, И.В. Динамика возрастной структуры древостоев и методы ее изучения / И.В. Семечкин // Вопросы лесоведения: сб. науч. тр. – Красноярск: СО АН СССР, 1970. – Т.1 – С.422-445.

Семечкина, М.Г. Структура фитомассы сосняков / М.Г. Семечкина. – Новосибирск: Наука, 1978. – 165 с.

Соколов, С.В. Исследование роста и товарности сосновых насаждений подзоны южной тайги Зауралья: автореф. дис...канд. с.-х. наук: 06.00.00 / Соколов Сергей Васильевич. – Свердловск, 1970. – 23 с.

Соколов, И.А. О почвах плато Путорана / И.А. Соколов // Путоранская озерная провинция. – Новосибирск: Наука, 1975. – Гл. 7. – С. 115-121.

Соколов, И.А. Геохимия автономного ортоэлювиального почвообразования и выветривания в тундролесной зоне плато Путорана. – М.: Наука, 1976. – С. 129-153.

Справочник по климату СССР. Вып. 21. Красноярский край и Тувинская АССР. – Л.: Гидрометеиздат, 1967. – 230 с.

Стаканов, В.Д. Методика определения запасов фитомассы и углерода лесных сообществ / В.Д. Стаканов, В.А. Алексеев, И.А. Коротков, Б.Л. Климушин // Углерод в экосистемах лесов и болот. – Красноярск, 1994. – С. 48-69.

Суставова, О.В. Структура и динамика сосновых древостоев искусственного происхождения в условиях степного Зауралья: автореф. дис...канд. с.-х. наук: 06.03.02 / Суставова Оксана Валерьевна. – Екатеринбург, 2004. – 22 с.

Сухих, В.И. Аэрокосмические методы в лесном хозяйстве и ландшафтном строительстве / В.И. Сухих. – Йошкар-Ола: Марийский гос. техн. ун-т, 2005. – 390 с.

Тишин, Д.В. Влияние природно–климатических факторов на радиальный прирост основных видов деревьев Среднего Поволжья. – автореф. дис... канд. биол. наук: 03.00.16 / Тишин Денис Владимирович. – Казань, 2006. – 24 с.

Третьяков, Н.В. Справочник таксатора / Н.В. Третьяков, П.В. Горский, Г.Г. Самойлович. – М.; Л.: Гослесбумиздат, 1952. – 854 с.

Третьякова, В.А. Дифференциация деревьев и рост культур основных лесобразующих пород Сибири: автореф. дис...канд. с.-х. наук: 06.03.03 / Третьякова Виктория Андреевна. – Красноярск, 2006. – 20 с.

Тюрин, А.В. Сезонное развитие дуба в европейской части СССР / А.В. Тюрин // Лесное хозяйство. – 1952. – №. 7. – С. 45-47.

Усольцев, В.А. Методы таксации фитомассы древостоев: Метод. указ. для студентов-дипломников специальности 1512 / В.А. Усольцев, З.Я. Нагимов. – Свердловск: УЛТИ, 1988. – 46 с.

Усольцев, В.А. Рост и структура фитомассы древостоев / В.А. Усольцев. – Новосибирск: Наука, 1988. – 253 с.

Усольцев, В.А. Фитомасса лесов Северной Евразии: нормативы и элементы географии / В.А. Усольцев. – Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 2002. – 762 с.

Фастовец, А.А. Структура фитомассы деревьев ели в высокогорьях Южного Урала / А.А. Фастовец, З.Я. Нагимов, П.А. Моисеев, И.Г. Шевченко // Социально – экономические и экологические проблемы лесного комплекса УГЛТУ: Сборник материалов научно – технической конференции. – Екатеринбург, 2003. – С. 308-309.

Фахрутдинова, В.В. Изменчивость структуры годичных колец у лиственницы Гмелина на северной границе леса (полуострова Таймыр) / В.В. Фахрутдинова,

В.Е. Бенькова, А.В. Шашкин // Сибирский лесной журнал. – 2017. – № 2. – С. 62-69.

Хантемиров, Р.М. Древесно-кольцевая реконструкция летних температур на севере Западной Сибири за последние 3248 лет / Р.М. Хантемиров // Сибирский экологический журнал. – 1999. – № 2. – С. 185-191.

Харук, В.И. Временная динамика лиственницы в экотоне лесотундры / В.И. Харук С.Т. Им, К.Д. Рэнсон, М.М. Наурзбаев // Доклады Академии наук. – 2004. – Т. 398, № 3. – С. 404-408.

Харук, В.И. Лиственничники лесотундры и климатические тренды / В.И. Харук, К.Д. Рэнсон, С.Т. Им, М.М. Наурзбаев // Экология. – 2006. – № 5. – С. 323-331.

Шавнин, А.Г. Возрастное строение и ход роста разновозрастных ельников Среднего Урала: автореф. дис... канд. биол. наук: 03.00.16 / Шавнин Александр Гаврилович. – Владивосток, 1962. – 15 с.

Шавнин, А.Г. Таксация насаждений по типам строения древостоев: учебное пособие / А.Г. Шавнин. – Свердловск: УЛТИ, 1990. – 104 с.

Шанин, С.С. Закономерности строения сосновых и лиственничных древостоев Сибири: автореф. дис... канд. биол. наук: 06.03.02 / Шанин Серафим Степанович. – Красноярск, 1967. – 30 с.

Шастин, В.И. Основы таксации вырубок и формирующихся на них молодняков в таежных лесах Прииртышья Омской области: автореф. дис... канд. с.-х. наук: 06.03.02 / Шастин Виктор Иванович. – Свердловск, 1970. – 23 с.

Шиятов, С.Г. Климатогенные смены лесной растительности на верхнем и полярном пределах ее распространения: автореф. дис. д-ра биол. наук: 03.00.16 / Шиятов Степан Григорьевич. – Свердловск, 1981. – 57 с.

Шиятов, С.Г. Дендрохронология верхней границы леса на Урале / С.Г. Шиятов. – М.: Наука, 1986. – 136 с.

Шиятов, С. Г. Цикличность радиального прироста деревьев в высокогорьях Урала / С.Г. Шиятов, В.С. Мазепа // Дендрохронология и дендроклиматология. – Н.: Наука, Сиб. отд-ние, 1986. – С. 134-160.

Шиятов, С.Г. Влияние климатических факторов на радиальный прирост деревьев в высокогорьях Урала / С.Г. Шиятов, В.С. Мазепа, Г. Фриттс // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. – 1992. – Т. 14. – С. 125-134.

Шиятов, С.Г. Изменения климата и их влияние на горные экосистемы национального парка «Таганай» за последние столетия / С.Г. Шиятов, В.С. Мазепа, П.А. Моисеев, Е.Ю. Братухина // Влияние изменения климата на экосистемы. – М., 2001. – С. 16-31.

Шиятов, С.Г. Климатогенная динамика лесотундровой растительности на Полярном Урале / С.Г. Шиятов, В.С. Мазепа // Лесоведение. – 2007. – № 6. – С. 1–13.

Шиятов, С.Г. Динамика древесной и кустарниковой растительности в горах Полярного Урала под влиянием современных изменений климата / С.Г. Шиятов. – Екатеринбург: УрО РАН, 2009. – 219 с.

Штибе, У.Л. Количественные показатели элементов крон ели в спелых ельниках-кисличниках Латвийской ССР: автореф. дис...канд. с.-х. наук. / Штибе Улдис Людвигович. – Елгава, 1967. – 23 с.

Юкнис, Р.А. Некоторые закономерности роста деревьев / Р.А. Юкнис // Моделирование и контроль производительности древостоев. – Каунас, 1983. – С. 118-121.

Яблоков, А.С. Культура лиственницы и уход за насаждениями / А.С. Яблоков. – М.: Гослестехиздат, 1934. – 128 с.

Яковлев, А.С. Оценка и нормирование экологического состояния почв в зоне деятельности предприятий металлургической компании "Норильский Никель" / А. С. Яковлев, И. О. Плеханова, С. В. Кудряшов, Р. А. Аймалетдинов // Почвоведение. – 2008. – № 6. – С. 737-750.

Янченко, З.А. Геодинамические процессы, морфология, ландшафт и особенности высотной поясности гор Путорана / З.А. Янченко, А.А. Романов, В.Я. Герасименко // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2010. – № 2. – С. 355-365.

Ambrose, A.R. Effects of height on treetop transpiration and stomatal conductance in coast redwood (*Sequoia sempervirens*) / A.R. Ambrose, S.C. Sillett, G.W. Koch [et al.] // *Tree Physiol.* – 2010. – Vol. 30, № 10. – P. 1260-1272.

Allen, C.D. A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests / C.D. Allen, A.K. Macalady, H. Chenchouni [et al.] // *Forest Ecology and Management.* – 2009. – Vol. 259, № 4. – P. 660-684.

Bigler, C. Drought as an inciting mortality factor in Scots pine stands of the Valais, Switzerland / C. Bigler, O.U. Bräker, H. Bugmann [et al.] // *Ecosystems.* – 2006. – Vol. 9, № 3. – P. 330-343.

Birdsey, R.A. Carbon Storage and Accumulation in United States Forest Ecosystems / R.A. Birdsey // *USDA Forest Service. General Technical Report.* – 1992. – Wo. 59. – 51 p.

Boulanger-Lapointe, N. Local variability in growth and reproduction of *Salix arctica* in the High Arctic / N. Boulanger-Lapointe, E. Lévesque, C. Baittinger, N. M. Schmidt // *Polar Research.* – 2016. – Vol. 35, № 1. – P. 1-11.

Burger, H. Holz, Blattmende und Zuwachs. III Mitteilung. Nedelmeng und Zuwachs bei Foehren und Fichfen verschidener Herkunft / H. Burger. – Zurich, 1937. – P. 101-114.

Burger, H. Hols, Blattmende und Zuwachs. XIII Mitteilung. Fichten in gleichalterigen Hcchwald / H. Burger. – Zurich, 1953. – P. 38-130.

Cook, E.R. A time series analysis approach to tree-ring standardization: dissertation / Cook Edward Roger. – University of Arizona, 1985. – 171 p.

Danby, R.K. Variability, contingency and rapid change in recent subarctic alpine tree line dynamics / R.K. Danby, D.S. Hik // *Journal of Ecology.* – 2007. – Vol. 95, № 2. – P. 352-363.

Dearborn, K.D. Aspect and slope influence plant community composition more than elevation across forest–tundra ecotones in subarctic Canada / K.D. Dearborn, R.K. Danby // *Journal of Vegetation Science.* – 2017. – Vol. 28, № 3. – P. 595-604.

Devi, N.M. Climate change evidence in tree growth and stand productivity at the upper treeline ecotone in the Polar Ural Mountains / N.M. Devi, V.V. Kukarskih, A.A. Galimova [et al.] // *Forest Ecosystems*. – 2020. – Vol. 7. – P. 1-16.

Dial, R.J. Changes in the alpine forest-tundra ecotone commensurate with recent warming in southcentral Alaska: Evidence from orthophotos and field plots / R.J. Dial, E.E. Timm, K. McMahon [et al.] // *Journal of geophysical research*. – 2007. – Vol. 4, № 112. – P. 1-15.

Dial, R.J. Shrubline but not treeline advance matches climate velocity in montane ecosystems of south-central Alaska / R.J. Dial, T.S. Smeltz, P.F. Sullivan [et al.] // *Global Change Biology*. – 2016. – Vol. 5, № 22. – P. 1841-1856.

Erteld, W. Groesse und Entwicklung des h/d-Wertes in Kieferbestaenden // *Allg. Forst- und Jagdzeitung*. – 1979. – Vol. 150. – P. 72-75.

Fourier, J. Remarques Generales Sur Les Temperatures Du globe Terrestree Et Des Espaces Planetaires / J. Fourier // *Annales de Chrimie et de Physique*. – 1824. – Vol. 27, № 2. – P. 136-167.

Fritts, H.C. Tree-rings and climate / H.C. Fritts. – London, New York, San Francisco: Acad. Press, 1976. – 576 p.

Gottfried, M. Continent-wide response of mountain vegetation to climate change / H. Pauli, A. Futschik, M. Akhalkatsi [et al.] // *Nature Climate Change*. – 2012. – Vol. 2. – P. 111-115.

Guarin, A. Drought triggered tree mortality in mixed conifer forests in Yosemite National Park, California, USA / A. Guarin, A.H. Taylor // *Forest Ecology and Management*. – 2005. – № 218. – P. 229-244.

Hagedorn, F. Treeline advances along the Urals mountain range - driven by improved winter conditions? / F. Hagedorn, S.G. Shiyatov, V.S. Mazepa [et al.] // *Global Change Biology*. – 2014. – Vol. 20, № 11. – P. 3530-3543.

Hagedorn, F. Latitudinal decline in stand biomass and productivity at the elevational treeline in the Ural mountains despite a common thermal growth limit / F. Hagedorn, M.A. Dawes, M.O. Bubnov [et al.] // *Journal of Biogeography*. – 2020. – № 47. – P. 1827–1842.

Hallinger, M. Establishing a missing link: warm summers and winter snow cover promote shrub expansion into alpine tundra in Scandinavia / M. Hallinger, M. Manthey, M. Wilmking // *New Phytologist*. – 2010. – № 186. – P. 890-899.

Hansson, A. A review of modern treeline migration, the factors controlling it and the implications for carbon storage / A. Hansson, P. Dargusch, J. Shulmeister // *Journal of Mountain Science*. – 2021. – Vol. 2, № 18. – P. 291-306.

Harsch, M.A. Are treelines advancing? A global meta-analysis of treeline response to climate warming / M.A. Harsch, P.E. Hulme, M.S. McGlone, R.P. Duncan // *Ecology Letters*. – 2009. – Vol. 12. – P. 1040-1049.

Holtmeier, F.K. Wind as an Ecological Agent at Treelines in North America, the Alps, and the European Subarctic / F.K. Holtmeier, G. Broll // *Physical Geography*. – 2010. – Vol. 3, № 31. – P. 203-233.

IPCC. Summary for Policymakers // *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* / ed. MassonDelmotte V. et al. Cambridge. United Kingdom and New York. – NY. USA: Cambridge University Press, 2021. – P. 3-32.

Jakubos, B. Invasion of subalpine meadows by lodgepole pine in Yellowstone National Park, Wyoming, U.S.A. / B. Jakubos, W.H. Romme // *Arctic and Alpine Res.* – 1993. – № 25. – P. 382-390.

Kaplan, J.O. The effects of land use and climate change on the carbon cycle of Europe over the past 5000 years / J.O. Kaplan, K.M. Krumhardt, N.E. Zimmermann // *Global Change Biology*. – 2012. – Vol. 18. – № 3. P. 902-914.

Kearney, M.S. Recent seedling establishment at timberline in Jasper National Park, Alberta / M.S. Kearney, B.H. Luckman // *Canadian Journal of Botany*. – 1982. – № 60. – P. 2282-2287.

Kirdyanov, A.V. 20th century treeline advance and vegetation changes along an altitudinal transect in the Putorana Mountains, northern Siberia / A.V. Kirdyanov, F. Hagedorn, A.A. Knorre [et al.] // *Boreas*. – 2012. – Vol. 41, № 1. – P. 56-67.

Körner, C. A reassessment of high elevation treeline positions and their explanation / C. Körner // *Oecologia*. – 1998. – Vol. 115. – P. 445-459.

Körner, C. Carbon limitation in trees / C. Körner // *Journal of Ecology*. – 2003. – Vol. 91. – P. 4-17.

Körner, C. Alpine treelines. Functional Ecology of the Global High Elevation Tree Limits / C. Körner. – Berlin: Springer, 2012. – 220 p.

Körner, C. Not every high-latitude or high-elevation forest edge is a treeline / C. Körner, G. Hoch // *Journal of Biogeography*. – 2023. – Vol. 5. – № 50. – P. 838 - 845.

Kramer, H. Vorrat und Nutzungsmöglichkeit forstlicher Biomasse in der Bundesrepublik Deutschland / H. Kramer, H. Krueger // *Der Forst-und Holzwirt*. – 1981. – 36 Jg, H. 2. – P. 33-37.

Kreutzer, K. Oekologische Fragen zur Vollbaumernte / K. Kreutzer // *Forst-Wissenschaftliches Centralblatt*. – 1979. – 98 Jg, H1. – P. 298-308.

Kullman, L. Tree-limit stress and disturbance a 25-year survey of geoeological change in the Scandes mountains of Sweden / L. Kullman // *Geografiska Annaler*. – 1997. – Vol. 79A. – P. 139-165.

Kullman, L. Post-Little Ice Age tree line rise and climate warming in the Swedish Scandes: a landscape ecological perspective / L. Kullman, L. Öberg // *Journal of Ecology*. – 2009. – Vol. 97. – P. 415-429.

Kuyek, N.J. Trees are larger on south slopes in late-seral conifer stands in north-western British Columbia / N.J. Kuyek, S.C. Thomas // *Canadian Journal of Forest Research*. – 2019. – Vol. 11, № 49. – P. 1349-1356.

Lavoie, C. Black spruce growth forms as a records of a changing winter environment at treeline, Quebec, Canada / C. Lavoie, S. Paeytte // *Arc. Alp. Res.* – 1992. – Vol. 24, № 1. – P 315-326.

Lehmann, G. Zusaetzlich gewinnbares Holz durch Ganzbaumnutzung duenner Kiefern aus der Jungbestandsflege / G. Lehmann, B. Guenther // *Beitrage fuer die Forstwirtschaft*. – 1985. – Bd. 19, H. 4. – P. 176-178.

Linderholm, H.W. Summer moisture variability in east central Sweden since the mid-eighteenth century recorded in tree rings / H.W. Linderholm, M. Niklasson, T. Molin // *Geografiska Annaler*. – 2004. – Vol. 86, № 3. – P. 277-287.

Little, R.L. Regeneration of subalpine fir (*Abies lasiocarpa*) following fire: effects of climate and other factors / R.L. Little, D.L. Peterson, L.L. Conquest // *Canadian Journal of Forest Research*. – 1994. – Vol. 24, № 5. – P. 934-944.

MacDonald, G.M. Climate change and the northern Russian treeline zone / G.M. MacDonald, K.V. Kremenetski, D.W. Beilman // *Philosophical Transactions B*. – 2007. – № 363. – P. 2285-2299.

Moiseev, P.A. Changes in the Structure and Phytomass of Tree Stands at the Upper Limit of Their Growth in the Southern Urals / P.A. Moiseev, M.O. Bubnov, N.M. Devi, Z.Ya. Nagimov // *Russian Journal of Ecology*. – 2016. – Vol. 47, № 3. – P. 163-172.

Myers-Smith, I.H. Shrub expansion in tundra ecosystems: dynamics, impacts and research priorities / I.H. Myers-Smith, B.C. Forbes, M. Wilmking [et al.] // *Environmental Research Letters*. – 2011. – Vol. 6. – Article 045509

Naurzbaev, M.M. Variations in early summer and annual temperature in the East Taymir and Putorana (Siberia) over the last two millennia inferred from tree-rings / M.M. Naurzbaev, E.A. Vaganov // *Journal of Geophysical Research*. – 2000. – Vol. 105, № 6. – P. 7317-7327.

Novenko, E.Y. Paleoenvironmental Changes, Vegetation Dynamics and Fire History in Northwest Putorana Plateau (Russian Subarctic) During the Last 1300 Years / E.Y. Novenko, N.G. Mazei, D.A. Kupriyanov [et al.] // *SSRN Electronic Journal*. – 2021. – Vol. 2, № 33. – P. 181-193.

Pearson, R.G. Shifts in Arctic vegetation and associated feedbacks under climate change / R.G. Pearson, S.J. Phillips, M.M. Lorant [et al.] // *Nature Climate Change*. – 2013. – Vol. 3, № 7. – P. 673-677.

Rossi, S. Evidence of threshold temperatures for xylogenesis in conifers at high altitudes / S. Rossi, A. Deslauriers, T. Anfodillo, V. Carraro // *Oecologia*. – 2007. – Vol. 1, № 152. – P. 1-12.

Rundqvist, S. Tree and Shrub Expansion Over the Past 34 Years at the Tree-Line Near Abisko, Sweden / S. Rundqvist, H. Hedenås, A. Sandström [et al.] // *AMBIO A Journal of the Human Environment*. – 2011. – Vol. 6, № 40. – P. 683-692.

Schulman, E. Dendroclimatic changes in semiarid America / E. Schulman. – Tucson, Arizona: University of Arizona Press, 1956. – 142 p.

Sturm, M. Snow–Shrub Interactions in Arctic Tundra: A Hypothesis with Climatic Implications / M. Sturm, J. P. Mcfadden, G. E. Liston [et al.] // *Journal of climate*. – 2001. – № 14. – P. 336-344.

Sturm, M. Winter Biological Processes Could Help Convert Arctic Tundra to Shrubland / M. Sturm, J. Schimel, G. Michaelson [et al.] // *BioScience*. – 2005. – Vol. 1, № 55. – P. 17-26.

Schweingruber, F.H. Tree Rings and Environment. Dendroecology / F.H. Schweingruber. – Birmensdorf, Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research. Berne, Stuttgart, Vienna, Haupt, 1996. – 609 p.

Tape, K. The evidence for shrub expansion in Northern Alaska and the Pan-Arctic / K. Tape, M. Sturm, C Racine // *Global Change Biology*. – 2006. – № 12. – P. 686-702.

Terskaia, A. Pathways of Tundra Encroachment by Trees and Tall Shrubs in the Western Brooks Range of Alaska / A. Terskaia, R.J. Dial, P.F. Sullivan // *Ecography*. – 2020. – Vol. 43. – P. 769-78

Thomasins, H.O. Studie zu einigen Relationen zwischen Wuchsflaeche, Zuwachs und individueller Stabilitaet von Waldbaeumen, dargestellt an der Baumart Fichte / H.O. Thomasins, D. Butter // *Beitraege f.d. Forstwirtschaft*. – 1984. – № 1. – P. 25-28.

Tyndall, J. On the Absorption and Radiation of Heat by Gases and Vapors, and on the Physical Connection of Radiation, Absorption and Conduction / J. Tyndall // *Philosophical Transactions*. – 1861. – Vol. 151. – P. 1-36.

Van den Bergh, T. Alnus shrub expansion increases evapotranspiration in the Swiss Alps / T. Van den Bergh, C. Körner, E. Hiltbrunner // *Reg Environ Change*. – 2018. – Vol. 18. – P. 1375-1385.

Vellend, M. Plant Biodiversity Change Across Scales During the Anthropocene / M. Vellend, L. Baeten, A. Becker-Scarpitta [et al.] // *Annual Review of Plant Biology*. – 2017. – Vol. 68. – P. 563-586.

Vowles, T. Implications of evergreen shrub expansion in the Arctic / T Vowles, R.G. Björk // *Journal of Ecology*. – 2019. – № 107. – P. 650-655.

Wang, T. Climatic signals in tree ring of *Picea schrenkiana* along an altitudinal gradient in the central Tianshan Mountains, northwestern China / T. Wang, H.B. Ren, K.P. Ma // *Trees - Structure and Function*. – 2005. – Vol. 19, № 6. – P. 735-741.

Weisberg, P.J. Spatial variation in tree regeneration in the forest-tundra ecotone, Rocky Mountain National Park, Colorado / P.J. Weisberg, W.L. Baker // *Can. J. of Forest Res.* – 1995. – № 25. – P. 1326-1339.

Woodward, A. Climate, geography, and tree establishment in subalpine meadows of the Olympic Mountains, Washington, U.S.A. / A. Woodward, E.G. Schreiner, D.G. Silsbee // *Arctic and Alpine Res.* – 1995. – № 27. – P. 217-225.

Xu, C. Long-term Forest resilience to climate change indicated by mortality, regeneration, and growth in semiarid southern Siberia / C. Xu, H. Liu, O. Anenkhonov [et al.] // *Global Change Biology*. – 2017. – № 23. – P. 2370-2382.