



МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ –
МСХА имени К.А. ТИМИРЯЗЕВА
(ФГБОУ ВО РГАУ - МСХА имени К.А. Тимирязева)

Институт агробиотехнологий
Кафедра химии

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(Магистерская диссертация)

**«Влияние городского микроклимата на скорость ассимиляции
углерода деревьями на примере лиственницы сибирской в условиях
города Москвы»**
название ВКР

по направлению 35.04.03 - «Агрохимия и агропочвоведение»
программе «Агроэкологический менеджмент, химико-токсикологический и
микробиологический анализ объектов агросферы»

Зав. выпускающей кафедрой

_____ (подпись, дата)

И.И. Дмитриевская
(ФИО)

«Допустить к защите»
« » _____ 2021 г.

Руководитель

_____ (подпись, дата)

А.М. Ярославцев
(ФИО)

Студент

_____ (подпись, дата)

Н.А. Чернова
(ФИО)

Рецензент

_____ (подпись, дата)

Н.П. Шабанова
(ФИО)

Нормоконтроль

_____ (подпись, дата)

В.М. Лапушкин
(ФИО)

Москва, 2021

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ.....	3
ГЛАВА 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ	5
1.1. Глобальные изменения климата	5
1.2. Экологические особенности городской среды.....	12
1.3. Экологические факторы леса	18
1.4. Строение годичных колец древесины и особенности их прироста	22
ГЛАВА 2. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ.....	30
2.1. Объекты исследования	30
2.2. Методы исследования.....	38
ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ	46
3.1. Оценка возрастного тренда	46
3.2. Оценка чувствительности и синхронности дендрохронологических рядов	48
3.3. Анализ климатического отклика	50
3.3.2. Корреляционный анализ.....	52
3.3.2. Анализ наложенных эпох.....	57
3.4. Цикличность прироста.....	64
Выводы.....	69
Литература	71

ВВЕДЕНИЕ

В прошлом и нынешнем столетиях мир переживает беспрецедентный рост городов. С 2008 года более половины населения мира проживает в городских районах (Laski & Schellekens, 2007). При этом урбанизация происходит одновременно с глобальными изменениями климата, и эти эффекты не независимы – существуют факты, доказывающие, что сигналы глобального потепления усиливаются городской средой (Кислов с соавт., 2017). Городская среда формирует особые микро- и мезоклиматические условия. Ухудшение городской среды в результате урбанизации можно увидеть на примере явления, известного как городской остров тепла, при котором в городах регистрируются более высокие температуры по сравнению с их не урбанизированными окрестностями (Ignatus, Wong 2015).

Под действием антропогенной нагрузки значительно трансформируется окружающая среда: происходит переуплотнение почвы, уменьшается доступность влаги и элементов питания для растений, происходит загрязнение воздушной среды, а так же поверхностных и грунтовых вод. Нехватка воды и повышенные температуры служат причиной стресса для городских древесных насаждений, в результате чего происходит сокращение прироста (Бухарина, 2012).

В связи с этим актуальной становится необходимость в оценке и прогнозе состояния древостоев. Одним из наиболее информативных показателей, отражающих жизненное состояние, продуктивность и степень воздействия на фитоценозы главных факторов окружающей среды, включая антропогенные, является скорость ассимиляции углерода (Суворова, 2015). Перспективным для оценки скорости ассимиляции углерода древесными насаждениями является дендрохронологический метод. Он позволяет на основе многолетних рядов годичного прироста деревьев расшифровать информацию об изменениях в окружающей среде.

Целью работы являлось изучение закономерностей колебаний радиального прироста *Larix sibirica* в различных микроклиматических условиях.

Задачи исследования:

1. Провести оценку возрастного тренда в различных типах местообитаний;
2. Выявить степень воздействия внешних факторов на динамику прироста;
3. Оценить вклад климатических факторов в динамику прироста;
4. Выявить цикличность радиального прироста.

ГЛАВА 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

1.1. Глобальные изменения климата

Существование проблемы изменения климата признано на межправительственном уровне, что выразилось в заключении Рамочной конвенции ООН об изменении климата (1992 г.) и Киотского протокола (1997 г.) в дополнение к ней. Одновременно с ростом средней температуры наблюдается увеличение осадков севернее 30° с.ш. При этом практически повсеместно зафиксировано увеличение экстремальных величин осадков. (Переведенцев, 2009).

Общеизвестно, что резкие смены климата, сменяемые таким же резким потеплением, в истории Земли происходили неоднократно. Причины этих изменений пока не ясны окончательно, однако в настоящее время считается, что ими служат как термодинамические процессы, происходящие на Земле, так и внешние воздействия, такие как колебания интенсивности солнечного излучения, и, вероятно, антропогенные факторы (Сидоренков, 2002).

Определяющим климат в масштабе тысячелетий процессом является плавный переход от одного ледникового периода к другому. Причины таких изменений климата остаются недоказанными окончательно, однако, среди основных внешних воздействий: изменения орбиты Земли (циклы Миланковича), солнечной активности (в том числе и изменения солнечной постоянной), вулканические выбросы и парниковый эффект. Из рисунка 1.1. можно видеть, что климатические индикаторы за последние 0,5 млн лет совпадают с межледниковыми температурными максимумами.

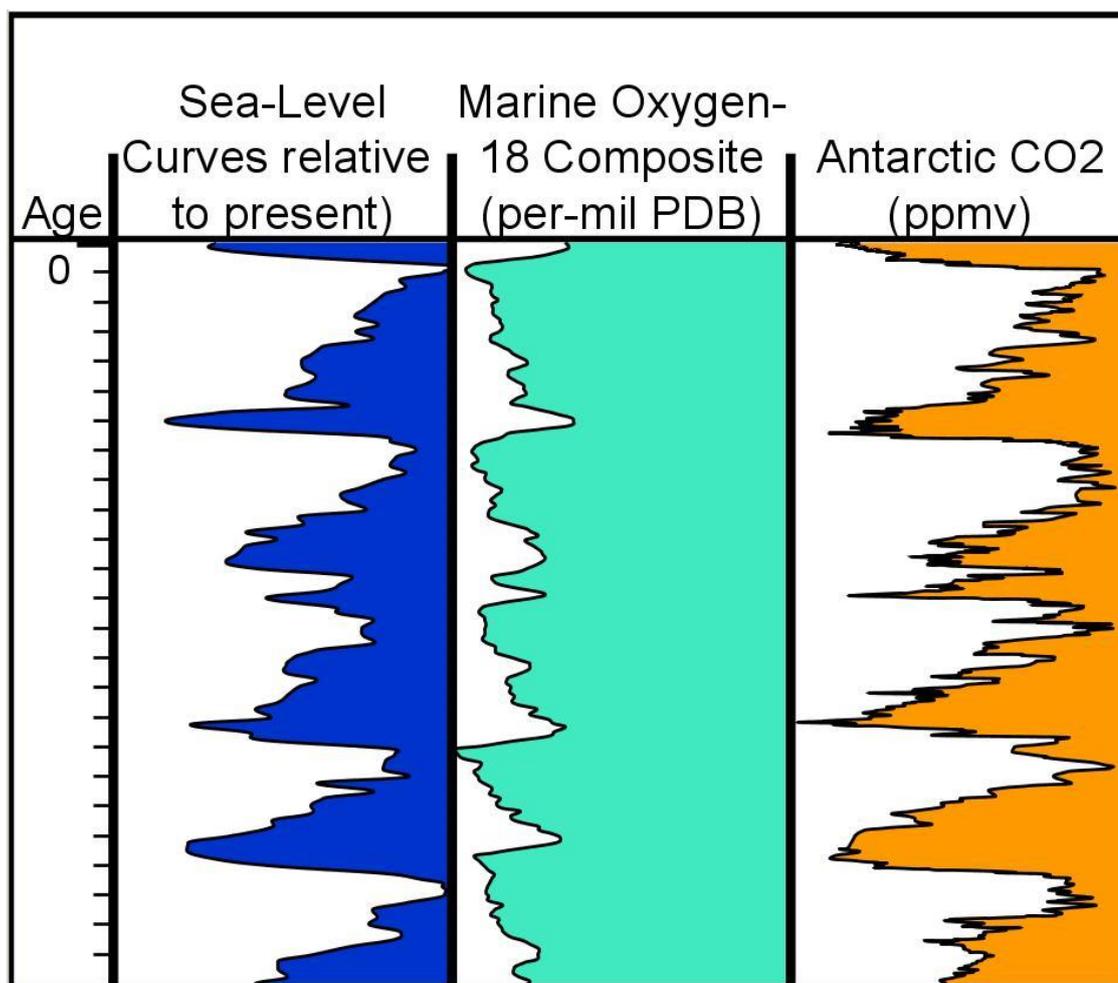


Рисунок 1.1 – Климатические индикаторы

Настоящее время приходится на межледниковье. (Астафьева, 2008).

Климатические изменения могут быть обусловлены изменениями прозрачности атмосферы и ее состава из-за вулканической активности Земли, изменением концентрации диоксида углерода, процессами, происходящими в океанах и ледниках, а также другими геологическими процессами, например изменением взаиморасположения материков и океанов, изменение количества тепла в глубинах океана и др (Астафьева,2008).

Изменения климата периодичны и зависят от повторяющихся процессов, происходящих в системе Земля – Солнце – окружающий космос. В настоящее время принято выделять четыре группы циклов:

1.Сверхдлинные. Их продолжительность составляет 150–300 млн лет, и, как правило, с ними связывают самые значительные изменения экологической обстановки на Земле. Существование сверхдлинных циклов обусловлено

тектоническими и вулканическими ритмами. Гигантские извержения происходят несколько раз в сто миллионов лет и могут влиять на климат в течение миллионов лет. Они часто служат причиной вымирания видов.

2. **Длинные циклы.** Продолжительность – десятки миллионов лет. Их появление также связывают с вулканическими ритмами.

3. **Короткие.** Вызваны изменениями в земной орбите и длятся сотни и тысячи лет

4. **Ультракороткие** Среди них есть цикл 2400 лет, около 200, 90, 11 лет. Считаются солнечнообусловленными. (Астафьева, 2008).

Парниковый эффект. Когда солнечная радиация достигает нашей атмосферы, часть радиации поглощается Землей, нагревая её поверхность. Это коротковолновая составляющая радиационного баланса, которая относится к солнечному свету. В свою очередь инфракрасное излучение мощностью 390 Вт/м², которое испускается поверхностью Земли – это длинноволновая часть радиационного баланса. Около 350 Вт/м² поглощается парниковыми газами, содержащимися в атмосфере. Часть этой радиации повторно отражается к земной поверхности, вызывая парниковый эффект, который нагревает нижние слои атмосферы и поверхности Земли и необходимый для поддержания на ней жизни. Естественный парниковый эффект обеспечивает среднюю температуру на Земле около +15 (Переведенцев, 2009).

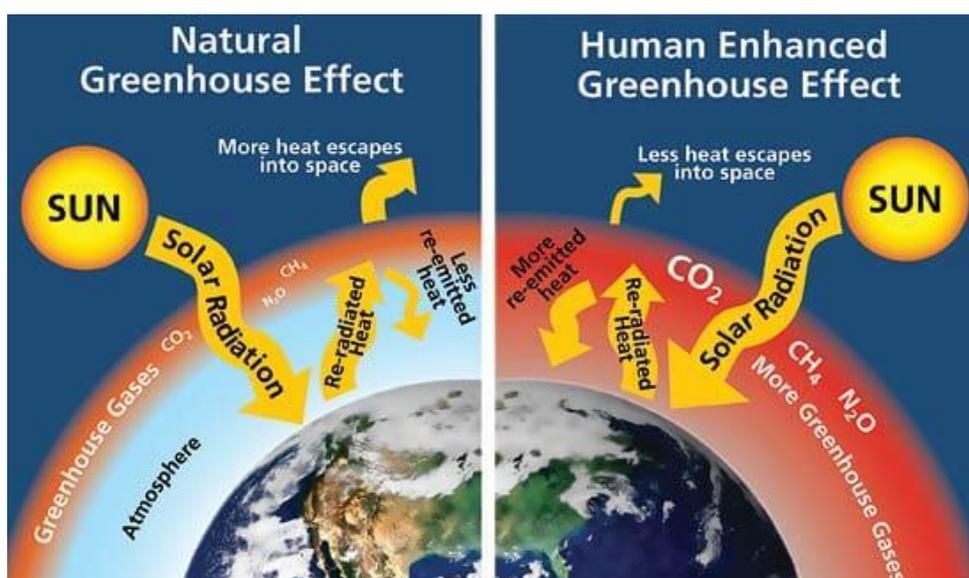


Рисунок 1.2. – Естественный и антропогенный парниковый эффект

В настоящее время считается, что доминирующую роль в формировании парникового эффекта играет углекислый газ (Шутов, Рябинин, 2009). Взаимосвязь концентрации углекислого газа в атмосфере и температуры Земли была описана ещё в 1896 году Сванте Аррениусом. Его расчёты показывали, что удвоение концентрации CO_2 в воздухе вызовет увеличение средней температуры на Земле на 5° (Svante Arrhenius, 1908)

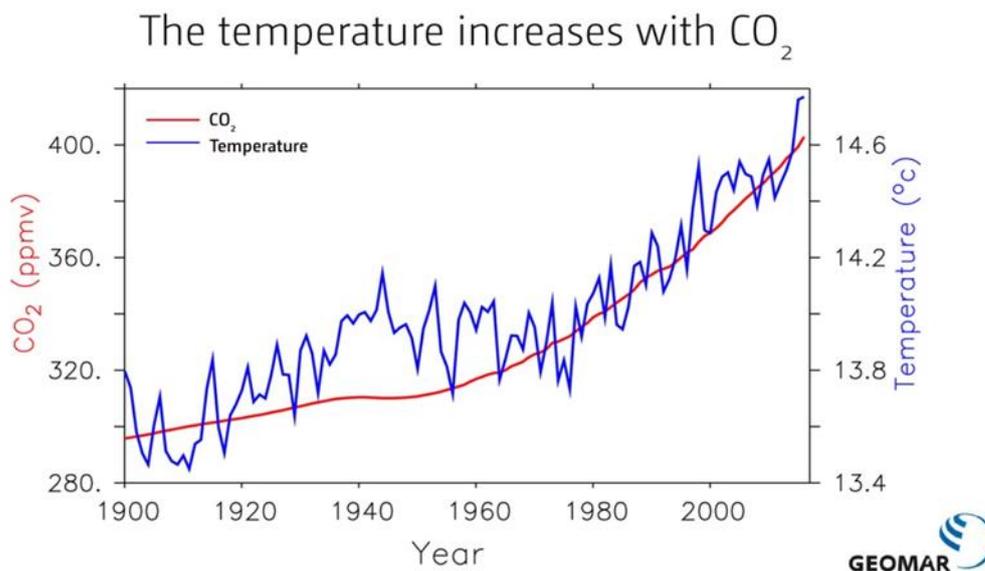


Рисунок 1.3 – Рост температуры и углекислого газа за последние 100 лет

В течение многих тысячелетий концентрация диоксида углерода в атмосфере Земли почти не менялась (IPCC, 2007). Согласно результатам анализа ледяного керна, взятого на антарктической станции Восток, в течение последних 400 тысяч лет уровень CO_2 в атмосфере Земли испытывал четырехкратные циклы колебаний (Petit et al., 1999). Хотя концентрация углекислого газа в атмосферном воздухе при этом изменялась в пределах от менее 200 до 300 ppm (Суворова, 2015).

В докладе Межправительственной группы экспертов по изменению климата отмечается, что концентрация основных парниковых газов на границе третьего тысячелетия достигла максимальных из зарегистрированных за весь период значений и продолжает повышаться. С доиндустриального времени (1750 г.) по 2005 г. концентрация CO_2 увеличилась на 35 % (с 280 до 379 ppm) (IPCC,

2007). Это соответствует диапазону колебаний между максимумом последнего оледенения – 190 ppm (18 тыс. лет назад) и оптимумом голоцена – 280 ppm. Эти данные свидетельствуют, что скорость современного изменения концентрации CO₂ выше, что может указывать на антропогенный фактор в содержании углекислого газа в атмосфере (Кондратьев и др., 2004). Как правило, это увеличение связывают с появлением дополнительного источника при сжигании топлива (Берёзина, 2009).

Антропогенные изменения углеродного цикла. Относительное постоянство содержания CO₂ в атмосферном воздухе поддерживалось благодаря равновесию всех составляющих биогеохимического круговорота углерода и буферной роли мирового океана (Берёзина, 2009).

Углеродный цикл основан на двух процессах планетарного значения: фотосинтетическом связывании углерода и его гетеротрофном высвобождении в процессе биологического разложения органического вещества (Мухин, Воронин, 2007).

В результате разложения тканей погибших организмов редуцентами CO₂ также поступает в круговорот. Этот процесс называется «почвенное дыхание». Таким образом, возвращение CO₂ в активный неорганический фонд происходит, главным образом, благодаря процессам дыхания, биологического разложения, гниения, окисления органического вещества почвы (гумуса, торфа, лесных подстилок), а также лесных и степных пожаров. Хотя фотосинтез и деструкция органики разделены в пространстве и во времени, они проходят через множество промежуточных этапов (Берёзина, 2009).

Пока вмешательство человека в круговорот углерода было минимальным, наземные растения ежегодно поглощали 120 млрд тонн CO₂. При этом большая часть органического вещества возвращалась за счёт дыхания организмов и гниения остатков их тел. В 19 веке с началом промышленной революции в атмосферный воздух дополнительно попало 500 млрд тонн углерода, 2/3 из которых из-за сжигания ископаемого топлива, 1/3 из-за вырубки лесов. Сейчас в

результате хозяйственной деятельности в атмосферу ежегодно попадает около 6,3 млрд.т углерода, ещё примерно 1,6 млрд. тонн выделяется во время лесных пожаров. (Берёзина, 2009).

Общий запас углерода на земле составляет более 26×10^{15} т (В. Лархер, 1979). Согласно оценкам МГЭИАК содержание углерода в атмосфере составляет примерно 730 млрд тонн, ещё 2010 млрд. т содержится в почве и около 466 млрд тонн – в наземной растительности. Однако самое большое количество растворено в океане или входит в состав планктона – 38000 млрд.т.

Большая часть углерода аккумулирована в горных породах, в первую очередь, карбонатах (таких как мел, известняк, мрамор, доломит, сидерит). Эта часть углерода принимает участие в большом геохимическом круговороте. Значительно меньшая часть углерода содержится в атмосферном воздухе, гидросфере и живых организмах. Однако этот углерод гораздо более мобилен и активно участвует в малом круговороте (И.В. Вольф, 2013).

Механизмы ассимиляции углерода. Согласно современным представлениям о бюджете углерода, половина выделяемого количества CO_2 : рассеивается в атмосфере, вызывая рост его концентрации, около четверти поглощается океанами, и ещё четверть ассимилируется растениями (рисунок 1.4).

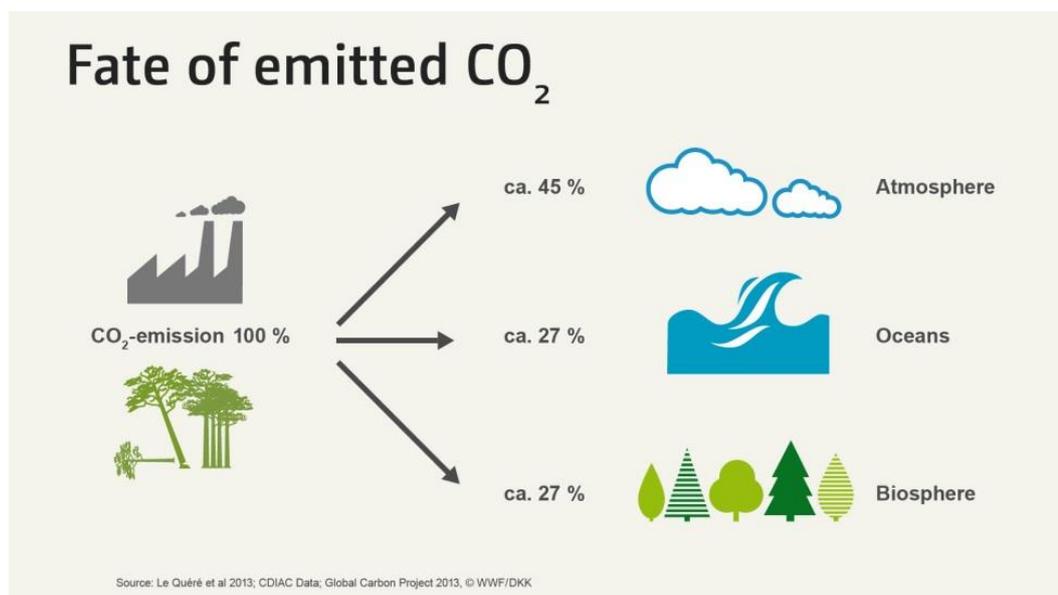


Рисунок 1.4. – Механизмы ассимиляции углерода

Обмен диоксидом углерода между атмосферным воздухом и океаном происходит постоянно. Мировой океан действует как насос, поглощая CO_2 в высоких широтах и выделяя его в тропиках. Увеличение концентрации CO_2 и его парциального давления в атмосфере, а также региональное или сезонное охлаждение вод вызывают увеличение концентрации CO_2 в воде и образование растворов бикарбонатов металлов. В дальнейшем бикарбонаты могут выпадать в осадок, связывая часть CO_2 в карбонатах. Оставшаяся часть CO_2 при этом снова выделяется в атмосферу. Снижение концентрации CO_2 в атмосферном воздухе или увеличение температуры приводит к дегазации вод океана. При этом в осадок выпадает эквивалентная часть углекислого кальция. Так углерод переходит в длительный геологический цикл, образуя карбонатные породы. Этот механизм естественного блокирования круговорота какого-либо вещества называют стагнацией. Общее количество накопленных в осадках карбонатов кальция и магния углерода достигает миллионов тонн.

Другим механизмом удаления диоксида углерода из атмосферы и гидросферы с последующим включением углерода в состав органических веществ служит фотосинтез. Органические вещества, которые образуются в процессе фотосинтеза составляют ткани фотосинтезирующих организмов и являются источником органических веществ для консументов. При дыхании происходит окисление сложных органических веществ, сопровождающееся выделением диоксида углерода, который может вновь вовлекаться в процесс фотосинтеза.

Процессы ассимиляции у растений протекают при температуре от 0°C до $40\text{-}50^\circ\text{C}$, достигая максимума при $30\text{-}35^\circ\text{C}$. Крайние и оптимальные температуры ассимиляции варьируются в зависимости от древесных пород. Так, на синтез 1 т древесной массы расходуется около 1,5-1,8 т углекислого газа. При этом происходит выделение от 1,1 до 1,3 т свободного кислорода. Количество поглощаемого CO_2 и выделяемого кислорода зависит от различных факторов, включая состояние и состав древесных насаждений, их возраст, полноту и т.д.

(Чураков, 2018). Например, 1 га лесополосы из тополя бальзамического в возрасте 60 лет за год поглощает 6 т углекислого газа и выделяет 4 т кислорода, а 1 га лесополосы из сосны обыкновенной в возрасте 45 лет поглощает 4,5 т углекислого газа в год и выделяет 3,5 т кислорода (Тимерьянов, 2010).

Период поглощения углекислого газа у хвойных пород дольше и суммарно 1 га этих насаждений поглощает парниковых газов больше, чем лиственные. Пока лиственные находятся в зимнем покое, сбросив листву, у хвойных продолжают процессы ассимиляции и дыхания (Лир и др., 1974) и увеличение депонирования углерода в тканях или снижение его запаса в течение зимнего периода зависит от соотношения двух процессов – ассимиляции и дыхания (Суворова, 2015). Если же вести расчет на единицу площади листьев и хвои, то интенсивность фотосинтеза и поглощения углекислого газа больше у лиственных. Вместе с тем древесные породы имеют различную интенсивность фотосинтеза. Максимальным фотосинтезом из лиственных пород характеризуются береза повислая, липа мелколистная, тополь бальзамический, из хвойных лиственница, которая поглощает углекислый газ почти в 1,5 раза интенсивнее, чем сосна (Тимерьянов, 2010).

1.2. Экологические особенности городской среды

В городе существуют различные микро- и мезоклиматические особенности. Микроклиматические различия зависят от мелкомасштабных различий в строении и свойствах подстилающей поверхности. Эти различия меньше в сравнении с особенностями климата, которые создаются влиянием других крупномасштабных географических факторов. (Хромов, 2002). Городская застройка ведет к редуцированию площади растительного покрова, а также к заполнению данных мест искусственными, часто водонепроницаемыми и накапливающими тепло материалами (Kasperidus, 2002).

Меняется комплекс климатических условий города: повышается температура воздуха на 1-3°C, увеличивается количество выпадающих осадков и ливневых дождей, нарушаются особенности их распределения по сезонам года,

увеличивается облачность, уменьшается количество солнечной радиации (особенно УФ). Образование и повторяемость туманов в 1,5-2 раза превышает пригородные зоны, особенно в зимнее время. Загрязнение атмосферы города увеличивает ее мутность, образование туманов типа смога снижает продолжительность солнечного сияния по сравнению с пригородом на 500 часов (Geyer, 2002).

В крупных городах часто нарушен свойственный для климатической зоны, в которой он находится, температурный режим, значительно повышается температура поверхности асфальтового покрытия и оголённых почв летом (на 10-15° С), а также запечатанных под асфальтом слоёв почвы (на 7-10 и более), увеличиваются годовые перепады температур почти в 2 раза (Николаевский, 1998).

Фотосинтез обусловлен колебаниями температуры почвы и воздуха: при низких значениях интенсивность поглощения CO₂ понижается. Этот эффект обусловлен главным образом уменьшением поглощения воды при низкой температуре, что часто приводит к закрыванию устьиц (Бухарина, 2012).

Высокая температура значительно увеличивает интенсивность транспирации, вызывая водный дефицит, из-за чего закрываются устьица и сокращается снабжение хлоропластов углекислотой. Под влиянием высокой температуры и освещенности происходит уменьшение скорости видимого фотосинтеза (Дальке, Головки, 2001). У лиственницы сибирской высокая температура подавляет истинный фотосинтез и усиливает дыхательную активность хвои. Воздействие высоких температур воздуха приводило к уменьшению интенсивности фотосинтеза у сосны и ели на 27 и 33 % соответственно (Щербатюк и др., 1991). Продуктивность фотосинтеза лиственницы сибирской непосредственно зависит от концентрации зеленых пигментов, которая, в свою очередь, регулируется температурой почвы (Филиппова и др., 2005).

Промышленность и транспорт влияют на газовый состав атмосферы, увеличивая концентрацию углекислого газа, что, наряду с задымлением, запыленностью негативно изменяет баланс природной энергии и освещения.

При этом над городом образуется купол – «тепловая шапка», в котором содержится большое количество загрязняющих веществ, который накрывает не только город, но и прилегающую к нему территорию. «Тепловая шапка» образуется на высоте 100-300 м над поверхностью земли и рассеивается при скоростях ветра более 7-9 м/с (Хромов, 2006).

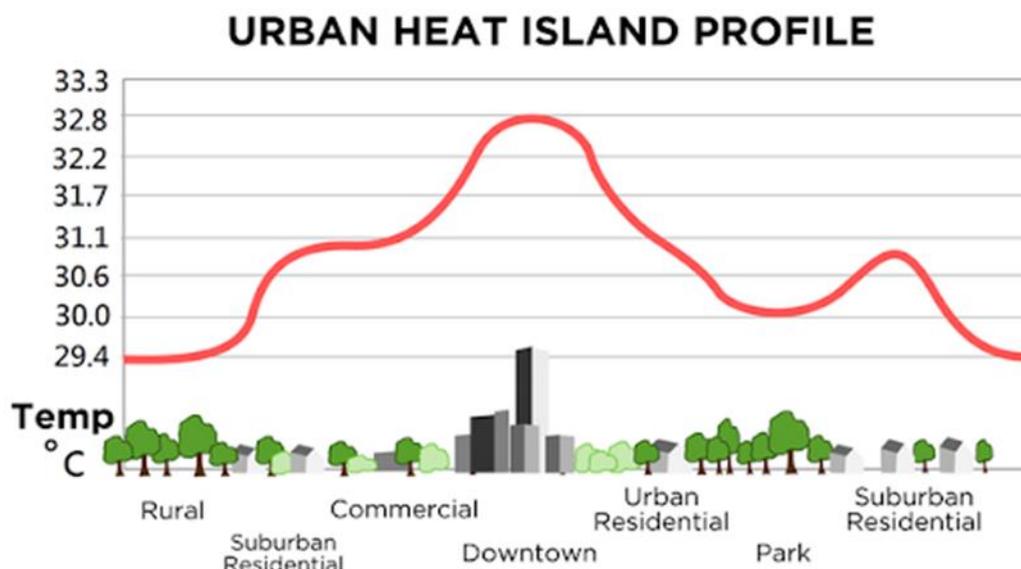


Рисунок 1.5 - Городской остров тепла

Система городских улиц и площадей приводит к изменениям ветра в городе. Ветер преимущественно направляется вдоль улиц. В общем скорость ветра в городе ослабевает, но в узких улицах усиливается. В тихую антициклоническую погоду на перегретой территории города наблюдается так называемый городской бриз. Слабые ветры направлены днём от окружающей местности к центру города при усилении восходящего движения воздуха над городом. При устойчивой стратификации атмосферы, в особенности при инверсии температуры, дым может накапливаться в приземном слое атмосферы в таких количествах, что оказывает вредное физиологическое воздействие (Хромов, 2006) Расстояние, на которое рассеиваются загрязнения и время их воздействия на экосистемы и растения зависит от направления и скорости ветра.

Отсутствие ветра при пасмурной погоде и высокой влажности приводит к тяжёлым отравлениям ассимиляционного аппарата растений. (Неверова, Колмогорова, 2003).

Действие токсичных для растений газов может происходить как путём их воздействия на ассимиляционный аппарат, так и косвенным путём – через почву. Первое вызывает сокращение роста, отмирание органов, а второе уменьшает плодородие почвы, вызывает гибель полезной микрофлоры, отравление корневой системы, нарушение минерального питания. Нарушая ход важнейших физиологических и биохимических процессов, тормозя рост и развитие и вызывая падение продуктивности, соединения токсичных газов сильно ослабляют растения. Например, одна из первых реакций хвойных на загрязнение – снижение устойчивости к низким температурам. Атмосферные токсиканты сбивают естественную динамику вхождения деревьев в зимний покой, нарушая состав сахаров. Например, сосны на загрязнённых территориях позже входят в состояние покоя, который имеет меньшую глубину, и раньше из него выходят. Часто не завершившие переход к зимнему покою растения оказываются не готовы к суровым условиям зимы и сильно повреждаются морозом (Берёзина, 2009)

Особенностью светового режима в урбаноэкосистемах является дополнительное освещение улиц, искусственно продлевающее световой день, которое нарушает фотопериодические реакции растений и естественные биологические ритмы поведения животных. (Колмогорова, 2003). Продолжительность освещения оказывает большое влияние на рост деревьев, при чём и в этом случае деревья разного географического происхождения реагируют различно: у деревьев южных пород побеги на длинном дне долго растут, поэтому не успевают подготовиться к зиме и вымерзают. Деревья северных пород на длинном дне, напротив, успевают хорошо подготовиться к зиме, замедлив рост (Кузнецов, 2005).

Следствием производственно-бытовой деятельности населения городов является образование мощных техногенных потоков веществ, приводящих к загрязнению территорий городов, трансформации городских почв (Неверова, Колмогорова, 2003). Почвенный покров городских территорий представлен обычно урбаноземами с отсутствием или нарушением генетических горизонтов. В состав городских почв входят строительный и бытовой мусор, промышленный шлам и шлаки, а также остатки сточных вод и другие примеси. В городских почвах отмечается превышение допустимого уровня содержания микроэлементов и, соответственно, переход их в разряд тяжелых металлов. В большинстве случаев загрязнение тяжелыми металлами затрагивает лишь поверхностные слои почвы (Федорова, Просвирина, Калаев, 2005).

По сравнению с зональными почвами урбаноземы характеризуются переуплотнением, более щелочной реакцией среды, нарушением водно-воздушного режима, снижением буферности и гумусированности (Соловьева, Ашихмина, Широких, 2011).

От аэрации почвы зависит скорость проникновения в почву кислорода и удаления из неё диоксида углерода, интенсивность накопления анаэробно образующихся соединений (сероводорода, метана и др), потеря и образование микроорганизмами необходимых растениям веществ (например нитратов). Аэрация обеспечивается системой почвенных пор, заиливание которых препятствует проникновению туда кислорода. На количество кислорода в почве сильно влияет температура и влажность, но эта связь неоднозначна. Так, при оптимальной влажности с повышением температуры содержание кислорода в почве падает, но в летнюю жару и засуху его концентрация в почве может быть максимальной (Кауричев, 1982). При нехватке кислорода изменяется отношение растений с почвенными организмами: увеличивается поражаемость паразитическими грибами, снижается активность микоризообразователей (Работнов, 1985).

Растения также могут страдать от минеральной недостаточности при недостатке кислорода, ещё и потому, что хотя корни не отмирают, они прекращают всасывание питательных элементов (М. Бигон, 1989).

В современных городах водные источники подвергаются загрязнению, канализируются или даже проводятся под землей. Использование грунтовых вод в питьевых и промышленных целях значительно снижает их уровень в городе, сильно ограничивая в засушливый период водоснабжение растений.

Уплотнение и закупоривание городских почв, а также отвод осадков через канализацию уменьшает образование грунтовых вод (Kasperidus, 2002). Подавляющее воздействие на фотосинтез оказывает недостаток влаги в почве (Молчанов, 1983). У растений в состоянии водного стресса отмечается уменьшение квантового выхода фотосинтеза (Mohanty, 1976) и снижение содержания пигментов (Alberte et al., 1977).

В условиях недостаточного водообеспечения высокие уровни солнечной радиации и температуры воздуха могут быть ингибирующими для фотосинтеза. У сосны при максимальных значениях температуры воздуха и солнечной радиации интенсивность газообмена в день исследования составила 40 % от максимума (Молчанов, 2007).

В условиях городской среды значительной трансформации подвергается флора и растительность. Происходит уничтожение естественной растительности, селективное подавление отдельных видов, осуществляется интродукция новых видов, идет стихийный процесс заноса не свойственных данной местности видов растений (Капитонова, 2010).

Древесные растения, произрастающие в условиях городской среды, испытывают стресс в течение всей жизни, т. е. постоянно находятся в состоянии, при котором необходимы дополнительные затраты на компенсацию стрессовых воздействий (Авдеева, 2007).

Поддержание определенного уровня устойчивости к стрессовым факторам, уменьшение их воздействия отражается в ответных неспецифических

или специфических реакциях: снижении интенсивности роста, репродуктивной способности и др. (стрессовый и приспособительный синдром). Достижение пороговых значений лимитирующих техногенных (острых или хронических) факторов нарушает сложившийся баланс, что приводит к потере устойчивости и преждевременной гибели растений (Авдеева, 2007).

1.3. Экологические факторы леса

Полог леса создаёт свой особый микроклимат или местный климат, существенно отличающийся от условий в окружающей открытой местности. Кроны деревьев ослабляют проникновение солнечной радиации; в густом лесу почти вся радиация будет рассеянной, а её интенсивность – незначительной. Соответственно под пологом леса снижается роль освещения. Функция деятельной поверхности в условиях леса переходит к кронам (Хромов, 2006).

Роль света в жизни деревьев огромна. Свет напрямую влияет не только на количественный прирост биомассы, в первую очередь древесины, но и на строение годичных колец, химический состав листьев, хвои и т.д. Свет влияет на лесовозобновление и многие другие процессы, происходящие в лесу. В молодом возрасте одна и та же древесная порода более теневынослива, чем в старом (Чураков, 2018).

Высокая освещённость необходима древесным растениям для заложения в почках зачаточных генеративных органов для последующего формирования урожая плодов и семян требуется. Именно поэтому плодоношение у деревьев и кустарников, растущих на опушке, всегда устойчивее и обильнее, чем у растущих в глубине леса. И даже у таких теневыносливых хвойных пород, как пихта и ель, макростробилы и зрелые шишки, которые образуются из них, расположены в верхней, хорошо освещенной части кроны (Будайчиев, 2006).

Непосредственно под кронами леса температура днём будет значительно выше, чем в открытой местности на той же высоте. Днём, в летний период, под пологом леса температура ниже, чем над кронами. В ночное время излучение охлаждает кроны, так как максимальные значения температуры по вертикали

наблюдаются в это время на высоте 1-2 м над кронами, а минимальные значения температуры внутри леса, поскольку холодный воздух стекает с высоты крон вниз. Радиационный и тепловой режим леса обусловлен возрастом и сомкнутостью леса, породным составом деревьев и других биологических факторов. Летом в лесу прохладнее, чем в поле, ночью – теплее. Зимой разность температуры между лесом и полем почти отсутствует. Среднегодовые температуры в лесу несколько ниже, чем в поле. Годовые амплитуды в лесу немного меньше (Хромов, 2006).

Воздух ветрового потока, как правило, в большей части просто обдувает лес сверху. Поэтому над кронами деревьев скорость ветра выше, чем на той же высоте на открытой местности. По мере удаления от опушки леса скорость ветра снижается. В пределах крон скорость вертикального ветрового потока особенно сильно снижается. Под кронами ветер слабый, а в пределах ближайшего к земной поверхности метра скорость убывает до нуля (Хромов, 2006).

Относительная влажность в лесных условиях выше по сравнению с полем на несколько процентов. Испарение над лесом слабее, чем хорошо развитая луговая растительность или полевые культуры, но оно продолжается более длительное время. При этом испарение непосредственно с почвы невелико. Существенную роль в нём играет транспирация крон, а также испарение осадков, задержанных кронами. Лес испаряет воду, полученную кронами с достаточно глубоких горизонтов, поэтому верхний слой почвы в лесу влажнее, чем в поле. Распределение снега в условиях леса равномернее, чем в открытой местности, а его плотность меньше благодаря ослаблению ветра. Однако в густых хвойных лесах значительное количество снега остаётся на кронах деревьев и впоследствии испаряется или сносится ветром. Таяние снега в лесу происходит значительно медленнее, а почва под мощным снеговым покровом промерзает на меньшую глубину, чем в поле (Хромов 2006).

Суммарное испарение с лесных массивов, чаще всего, выше суммарного испарения с поверхности суши речного бассейна или его части в данном районе.

Это вызвано увеличением периода вегетации леса и большими значениями радиационного баланса деревьев по сравнению с наземной травянистой растительностью. Из-за увеличения шероховатости подстилающей поверхности количество осадков над лесами увеличивается (Дроздов, 1989).

Леса вызывают подъем линий тока в воздухе, увеличивают турбулентность, и, как следствие, увеличивают конденсацию влаги. Значительную роль имеет размер территории, занимаемой лесом. Так, показано, что увеличение осадков теплого периода происходит на 1-3 % на каждые 10 % площади леса. При этом что в любом географическом районе значительный процент выпадающих атмосферных осадков остаётся на кронах деревьев. В зависимости от вида и строения деревьев, а также интенсивности осадков величина задерживаемой воды может изменяться от 1 до 16 % и более от общей суммы выпавших осадков. Например, еловые леса задерживают в 2-3 раза больше осадков, чем сосновые. Сосняк в возрасте 32-60 лет задерживает кронами 12 %, а в возрасте 80-110 лет - 14% осадков. Узколистные породы (например, берёза) задерживают менее 10 % осадков (Дроздов, 1989).

Таким образом, почва под лесом недополучает значительное количество осадков. Потери влаги в лесу из-за задерживания осадков кронами деревьев снижает стекание воды по веткам и стволам. Наличие воды является важным фактором для процесса фотосинтеза. Дефицит воды у растений может возникать в течение дня, при превышении скорости транспирации скорости поступления воды в лист, а может носить сезонный характер, если в почве происходит истощение запасов влаги (Орт и др., 1987). Максимальные значения видимого фотосинтеза наблюдаются, когда лист испытывает небольшой водный дефицит (порядка 5–20 % от полного насыщения) при открытых устьицах. Однако при сильном обезвоживании может произойти нарушение структуры хлоропластов, что вызовет полную потерю их фотосинтетической активности (Суворова, 2015).

Стоит отметить также существенные отличия в высоте снежного покрова и суммарном запасе воды в лесу и на прилегающей к нему территории. Известно,

что в лесу высота снежного покрова и общие запасы воды больше, чем на открытой местности (Дроздов, 1989).

Распределение снега в лесу равномернее, чем на открытых территориях, а его плотность ниже из-за ослабления скорости ветра. Из-за снижения вертикального воздухообмена и затенения почвы таяние снега в лесу замедленно. В лиственном лесу оно начинается почти одновременно с таянием снега на поле, а в более тёмном хвойном немного запаздывает (Дроздов, 1989).

Продолжительность снеготаяния в еловых лесах, как правило, в 2-3 раза выше, чем на открытом месте, другие леса занимают промежуточные положения. К концу зимы, когда высота снежного покрова достигает максимальных значений, а температура воздуха относительно высокая, запасов тепла в почве обычно достаточно, чтобы почва оттаяла под снегом (Дроздов, 1989).

При сгорании и разложении органического вещества в атмосферном воздухе увеличивается концентрация CO_2 . Если органика открытых участков перегнивает в течение года, то в лесу из года в год происходит накопление биомассы, гниению подвергается только опад, большая часть которого превращается в CO_2 . Однако соотношение выделенного при фотосинтезе кислорода и образованного при разложении опада CO_2 — в пользу кислорода. Увеличение в воздухе леса концентрации углекислого газа способствует повышению интенсивности фотосинтеза, (Абаимов, 2006).

В фитоценозах нередко отмечается дневное уменьшение концентрации CO_2 , обусловленное фотосинтезом. К примеру, утром с началом фотосинтеза концентрация CO_2 в приземном воздухе снижается. К полудню происходит повышение температуры, почвенное дыхание происходит интенсивнее и количество диоксида углерода в кронах деревьев значительно выравнивается. После захода солнца процесс фотосинтеза останавливается, начинает преобладать дыхание, и содержание углекислого газа в прилегающем к почве слое воздуха возрастает. В безветренную погоду она может достигать 0,4%, что

объясняется дыханием почвы и отсутствием конвекционных токов (Берёзина, 2009).

В нижнем слое воздуха леса содержание CO_2 может в 6 раз превосходить среднее значение, а над окультуренной почвой и в 10 раз. Интенсивность дыхания почвы может быть настолько значительной, что условия для фотосинтеза растений в приземном слое становятся гораздо более благоприятными. Так, например, в лесном фитоценозе минимальное содержание углекислого газа приходится на слой крон, поскольку там происходит его интенсивное поглощение при фотосинтезе, а максимальное содержание отмечается в нижнем ярусе. Повышенная концентрация CO_2 в приземном слое частично компенсирует растущим деревьям недостаток света (Берёзина, 2009).

Все факторы окружающей среды в природе воздействуют на растения не поодиночке, а в комплексе. Усиление или ослабление воздействия одного из факторов обязательно вызовет изменение в воздействии других факторов. Рост температуры вызывает изменения влажности воздуха и почвы из-за усиления ее испарения, увеличивается скорость фотосинтеза, что приводит к изменению газового состава воздуха. (Абаимов, 2009).

1.4. Строение годичных колец древесины и особенности их прироста

Самый большой объём в массе древесного ствола занимает древесина. Она построена из трех видов тканей: сосудов, механической ткани и паренхимы, выполняющей запасающую функцию. Такое строение древесины характерно для покрытосеменных растений. Древесина голосеменных имеет значительные отличия. Вместо сосудов в ней имеются трахеиды – менее совершенный проводящий элемент, отсутствует склеренхима и очень мало паренхимных тканей. Древесина хвойных, на 90—95 % состоит из трахеид, располагающихся правильными радиальными рядами. Общая черта проводящих тканей и склеренхимы — одревеснение клеточных стенок, пропитывание их лигнином, приводящее к их утолщению и уплотнению. Клеточные стенки твердеют и

становятся менее гибкими. Их одревеснение наступает очень быстро, почти сразу после отделения молодых клеток камбием. (Абаимов, 2009).

Существенные изменения древесины происходят с возрастом: отмирают живые клетки, а происходит закупорка и потеря функциональности проводящих тканей. Это делает ткани центральной части ствола и крупных ветвей мертвыми и способными к выполнению только механических функций. У многих пород эту омертвевшую часть древесины можно чётко выявить по окраске. Её называют ядром, а наружную (периферическую) часть - заболонью. Породы с чётким разделением древесины на ядро и заболонь называются ядровыми (дуб, вяз, сосна, лиственница и др.), а те, у которых мертвая центральная часть не выражена, — заболонными (береза, клен и др.) (Абаимов, 2009).

В течение каждого вегетационного периода годичное кольцо образуется из уникального набора клеток, который называется сосудистый камбий. Клетки сосудистого камбия находятся между корой и внешними клетками годичного кольца, образовавшиеся в прошлом году (рис. 1.6). Когда эти клетки делятся, они производят уникальные типы тканей внутри (сердцевина) и снаружи (со стороны коры) стебля. Сосудистый камбий активен в течение вегетационного периода; он возобновляется каждую весну и находится в состоянии покоя зимой. Ткань, продуцируемая сосудистым камбием, снаружи называется флоэмой. Ткань, образующаяся внутри стебля, - это ксилема. Древесина - это ксилема, а годичные кольца представляют собой слои ксилемы, которые ежегодно производятся сосудистым камбием (Baas, 2019).

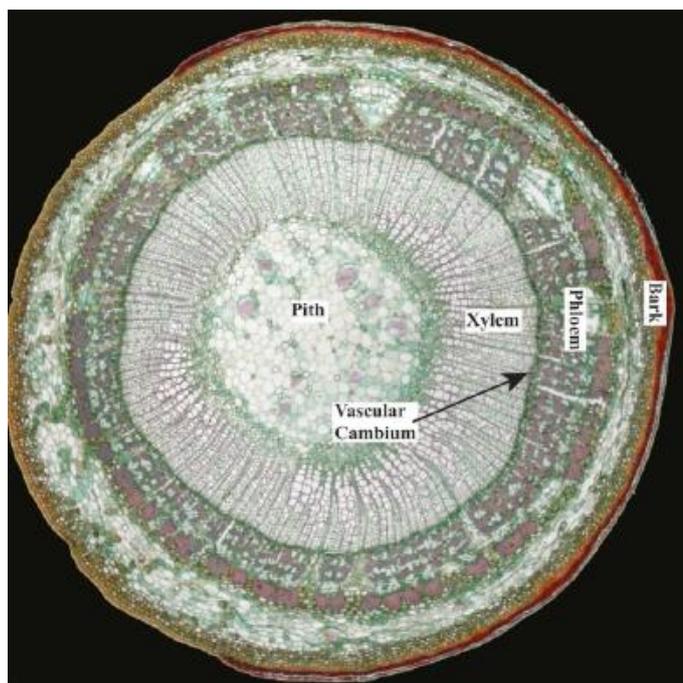


Рисунок 1.6. Строение стебля

Годичное кольцо обычно состоит из двух частей. Одна часть, называемая весенней (ранней) древесиной, развивается в первой половине вегетационного периода и состоит, главным образом, из тонкостенной и широкополостной проводящей ткани. Другая часть годичного кольца выполняет механическую функцию и состоит из тонкостенных и узкополостных поздних элементов. Она развивается во второй половине вегетационного периода – летом и частично осенью и называется поздней или летней древесиной. Для поздней древесины характерны высокие технические свойства, поэтому от объёма поздней древесины зависят многие физико-механические свойства древесной породы. Как правило, переход ранней древесины в позднюю постепенен, поэтому чёткие границы между ранней и поздней древесиной отсутствуют (рис 1.7). (Матвеев, 2013).

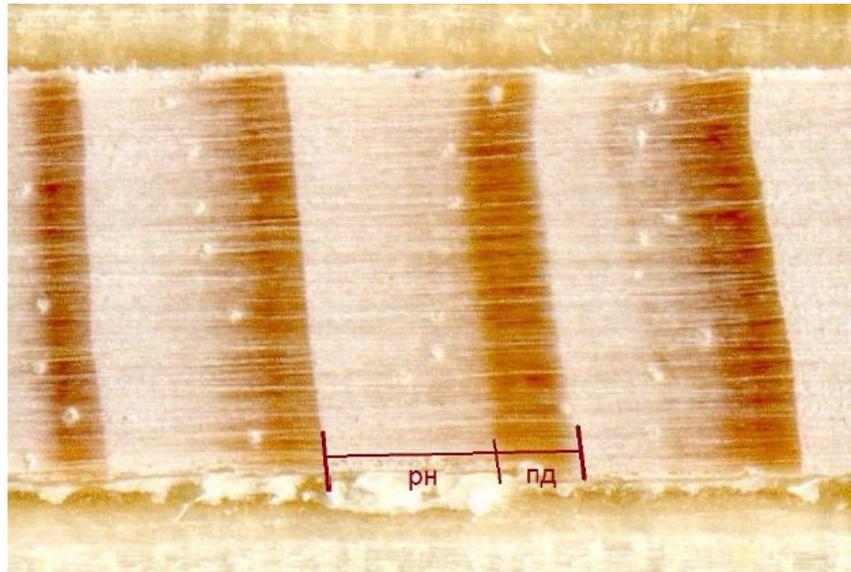


Рисунок 1.7. – Годичные кольца у сосны обыкновенной

Существование ранней и поздней древесины отражает изменения физиологических функций древесины в различные периоды года. В умеренном климате, в начале вегетационного периода, дерево нуждается в максимальном количестве воды и питательных элементов. Поэтому весной камбий развивает элементы, обладающие большой пропускной способностью. Они имеют большие полости и тонкую оболочку. Во вторую половину вегетационного периода, наоборот, стволу приходится удерживать тяжёлую крону, поэтому дерево образует механические элементы с толстой оболочкой. Именно поэтому камбий продуцирует позднюю древесину после достижения листьями максимальных размеров (Матвеев,2013).

Чаще всего годовичные слои строго соответствуют приросту одного календарного года. Однако в ряде случаев происходит выпадение отдельных годовичных колец или, наоборот, отложение за один год двух и более слоев древесины. Если переход в состояние покоя на часть сезона не происходит, формируется диффузная кольцевая граница, где нет чёткого перехода от одного года к другому. При повреждении корня поступление питательных веществ к дереву ограничено и это может приводить к формированию реактивных колец. Несколько колец нормального размера могут сжиматься до очень маленького размера, а иногда и полностью исчезать (Speer, 2010). Выпадение характерно для голодающих деревьев, а также старых или угнетённых деревьев, когда камбий неактивен, а двухслойное отложение связано с перерывом в деятельности камбия в течение вегетации. Удвоение колец можно наблюдать у деревьев, переживших сильные весенние заморозки, которые прерывают нормальное функционирование камбия и приводят к образованию слоя паренхимной ткани (Абаимов, 2009). Аномалии годовичных колец представлены на рисунке 1.8.

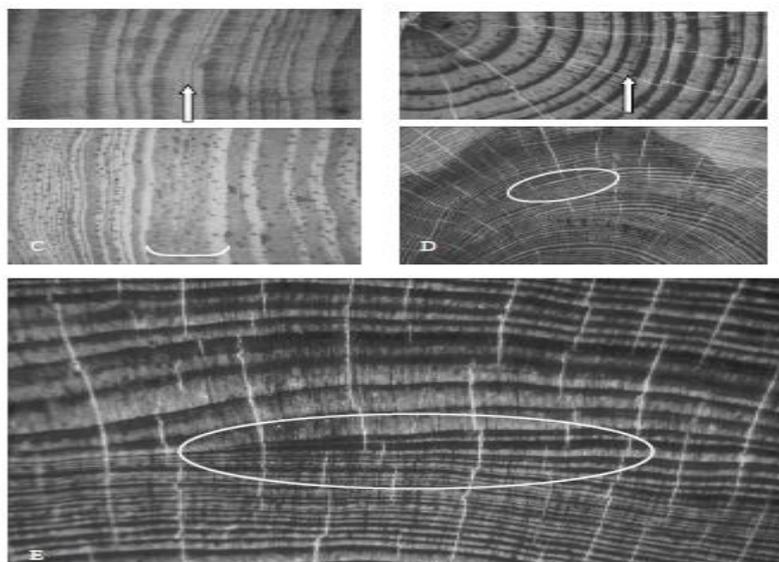


Рисунок 1.8. Аномалии колец у сосны западной (*Pinus occidentalis*). А – микрокольца, В – отсутствующие кольца, С – диффузные кольца, Д – реактивные кольца

Сроки начала и прекращения роста могут значительно варьировать в зависимости от древесной породы, климата и лесорастительных условий. Помимо этого, величина прироста неравномерна в различные месяцы вегетационного

периода. Так, например, ясень продуцирует годичное кольцо очень быстро – около половины годичного прироста происходит в мае-июне, а уже после июля активность камбия прекращается. В то время как у берёзы в начале вегетационного периода образуется только треть годичного кольца, наиболее интенсивный рост происходит в июле и около трети кольца вырастает в начале сентября. У ели и лиственницы половина кольца формируется в мае-июне, после июля активность камбия значительно снижается (Матвеев, 2013).

Рост и развитие растения проходят в определенном диапазоне температур. Для большинства древесных растений температурный оптимум - около 15 — 30 °С. Сроки наступления фенологических фаз и длительность межфазных периодов обусловлена колебаниями температуры воздуха и почвы. Оптимальные температурные условия способствуют более раннему наступлению всех весенне-летних фенофаз, а также созреванию плодов и семян в осенний период. Излишне высокие температуры, наоборот, тормозят ростовые процессы, что приводит к более позднему наступлению фенофаз. В осенний период повышенная температура может продлить вегетационный период и привести к более позднему отмиранию листьев. Холодная погода, напротив, вызывает раннее опадание листьев и сокращение вегетационного периода (Абаимов, 2009). Увеличение скорости роста при повышении температуры сопровождается сокращением периода роста (Кузнецов, 2006).

Чаще всего майские и июньские засухи, дождливые периоды и периоды с повышенной и пониженной температурой отражаются на строении ранней древесины, негативные погодные явления в июне – переходной, в августе и сентябре – в строении переходной и поздней древесины (Ваганов, Терсков, 1977).

Факторы, определяющие величину годичного прироста древесины. На ширину годичного прироста древесины оказывают большое влияние как внутренние, так и внешние факторы, действующие комплексно (Матвеев, 2013).

1) Древесная порода. Для некоторых растений, таких как бук, характерны узкие годовичные кольца шириной до 1 мм, для некоторых – широкие, свыше 1 см (Матвеев, 2013).

2) Возраст. В индивидуальном развитии деревьев принято выделять несколько возрастных состояний, наибольший интерес из которых представляют ювенильное и синильное. В ювенильном состоянии рост подчиняется экспоненциальному закону. Синильное состояние – стадия старения, завершающая жизнь дерева (Кузнецова, 2014).

Продолжительность жизни и время старения обусловлены генетически, однако в зависимости от условий произрастания сенильная стадия может наступать в разное время (Кузнецова, 2014).

Есть несколько особенностей, характерных для деревьев, выросших в неблагоприятных условиях. В ходе анализа радиального прироста у большого количества модельных деревьев, произрастающих на верхнем пределе их существования, Шиятов доказал, что у них не наблюдается такого четко выраженного изменения ширины годовичных колец с возрастом, как у деревьев, растущих в оптимальных для них условиях (Шиятов, 1986).

Снижение или даже отсутствие кривой ювенильного периода роста отмечено у тех деревьев, которые произрастают в неблагоприятных условиях (фитоценологических, почвенно-грунтовых, климатических и др.). Это свидетельство того, что у таких деревьев величина годовичного прироста в большей степени лимитируется внешними, а не внутренними факторами, а заложенный генетически потенциал роста реализуется только частично (Шиятов, 1986).

Лучше всего возрастной тренд прослеживается у деревьев, произрастающих на плодородных почвах легкого механического состава вдоль берегов ручьев и рек. На переувлажненных, сильно обдуваемых ветром или засушливых местообитаниях кривая ювенильного периода роста выражена слабее. Более того, степень выраженности этой кривой зависит от того,

насколько благоприятными были условия, в которых росло дерево на начальном этапе своего онтогенеза (Шиятов, 1986).

Не менее важной особенностью возрастной кривой у деревьев, выросших в неблагоприятных условиях, является значительно более позднее наступление возрастного максимума прироста, чем у деревьев, растущих в оптимальных условиях. Как правило, максимальный прирост наблюдается в возрасте 50-120 лет, а то и позднее, в то время как у деревьев, выросших в благоприятных условиях – в возрасте до 20-40 лет (Шиятов, 1986).

Ход возрастной кривой может зависеть и от некоторых других факторов, например происхождения. Дерево порослевого происхождения в первые годы образует широкие годичные слои, которые сужаются с возрастом, дерево семенного происхождения, наоборот, в первые годы образует узкие кольца, после усиления корней начинается активный рост, только потом начинается возрастное снижение (Матвеев, 2013).

3) Плодоношение. В годы с хорошим плодоношением большая часть накопленных органических веществ расходуется на формирование плодов и семян.

Таким образом, годичный прирост формируется под влиянием различных биотических и абиотических факторов. В процессе роста оно накапливает информацию об изменениях, происходящих в окружающей среде и может служить её индикатором.

ГЛАВА 2. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

2.1. Объекты исследования

Лиственничная аллея. Появилась как дорога от усадьбы Петровское до Дмитровского шоссе в 1750-х годах при постройке Г. К. Разумовским усадьбы. В 1863 году здесь вдоль дороги были посажены учёным Р. И. Шредером сибирские лиственницы, образовавшие аллею. В конце 1920-х — начале 1930-х годов аллея была застроена учебными корпусами и общежитиями академии. До середины 1990-х годов аллея была доступна для движения транспорта.



Рисунок 2.1. Лиственничная аллея

Лесная опытная дача (ЛОД) занимает площадь 232,3 га, расположена в северо-западной части Москвы и входит в юго-западную часть землепользования РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева. По природным условиям она находится в южной подзоне хвойно-широколиственных лесов.

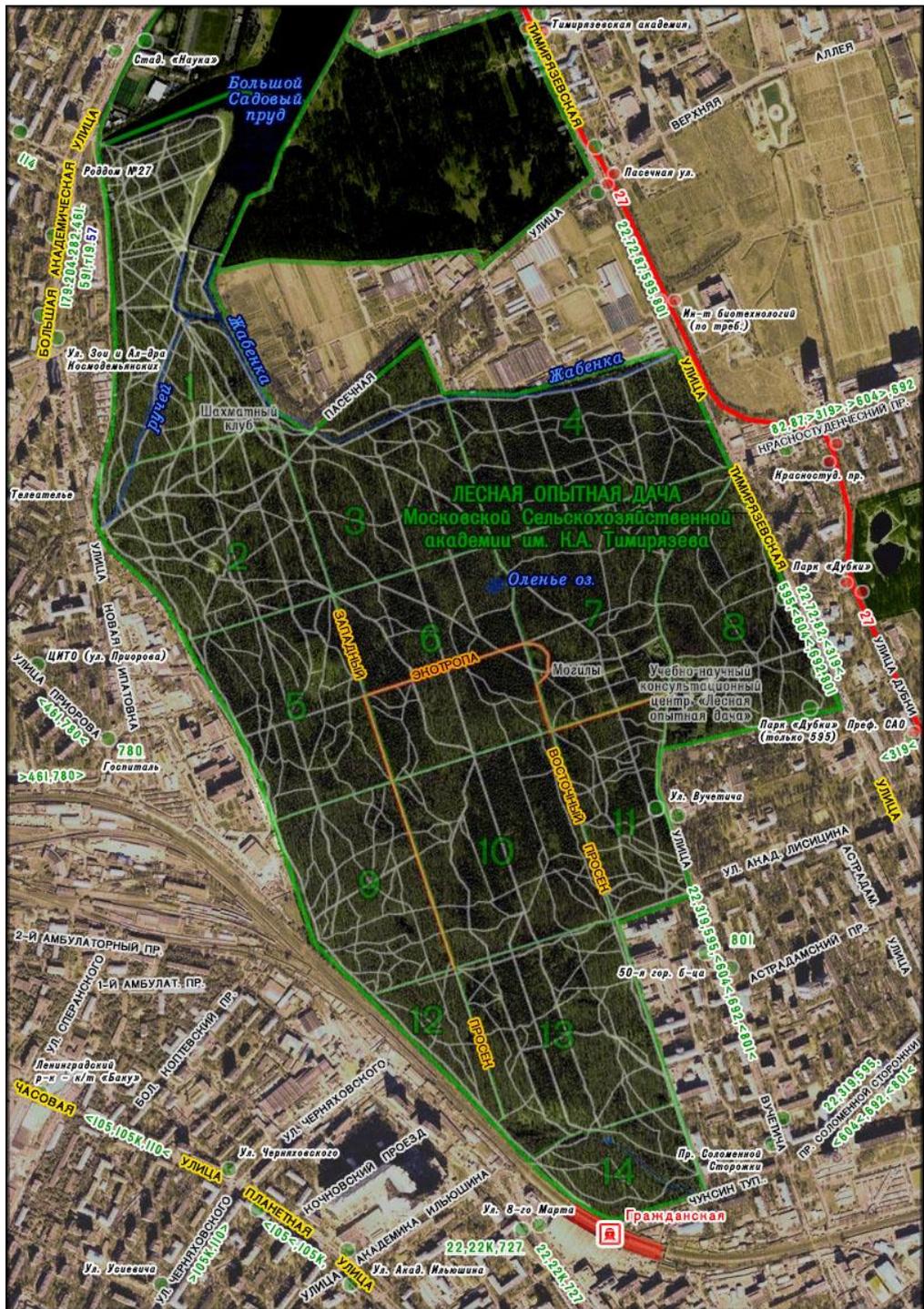


Рисунок 2.2. Территория лесной опытной дачи

ЛОД окружена плотным кольцом многоэтажных строений (рисунок 2.2). С северной стороны к ней примыкают земли плодовой и овощной станции, с восточной – жилые здания Тимирязевской улицы и улицы Вучетича, завод металлических изделий и линия железной дороги Москва-Рига, с южной и восточной –многоэтажные новостройки (Наумов, 2009).

Первое лесоустройство лесной опытной дачи было проведено в 1862 году А.Р. Варгасом де Бедемаром. Он провел геодезическую съемку лесных насаждений и разделил его на 14 кварталов, составил план лесонасаждений, провёл таксацию, описал характеристику древесных пород, составил план хозяйствования. С 1923 г. по южной и восточной границам ЛОД началось строительство жилых домов, а с 1932-1935 – индустриальных предприятий и многоэтажных жилых домов (Наумов, 2009).



Рисунок 2.3. – Территория РГАУ-МСХА на плане Москвы 1925 года
(Источник: <http://retromap.ru>)

Территория МСХА им. К.А. Тимирязева была объявлена заповедником Постановлением Совета Народных Комиссаров СССР 3 декабря 1940 года №2442, и это существенно улучшило ситуацию на ЛОД. Во время Великой отечественной войны 1941-1945 пострадало большое количество деревьев (Наумов, 2009).



Рисунок 2.4. – Территория РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева по данным немецкой аэрофотосъемки 1939-1943 годов. Коллаж составлен на основе снимков, находящихся в архивах США (U.S. National Archives and the U.S. Library of Congress) . (Источник: <http://retromap.ru>)

В послевоенные годы строительство жилых и промышленных зданий стремительно возросло, и к 1962 году лесная опытная дача оказалась в окружении многоэтажных зданий, заасфальтированных дорог с интенсивным движением транспорта (Наумов, 2009).

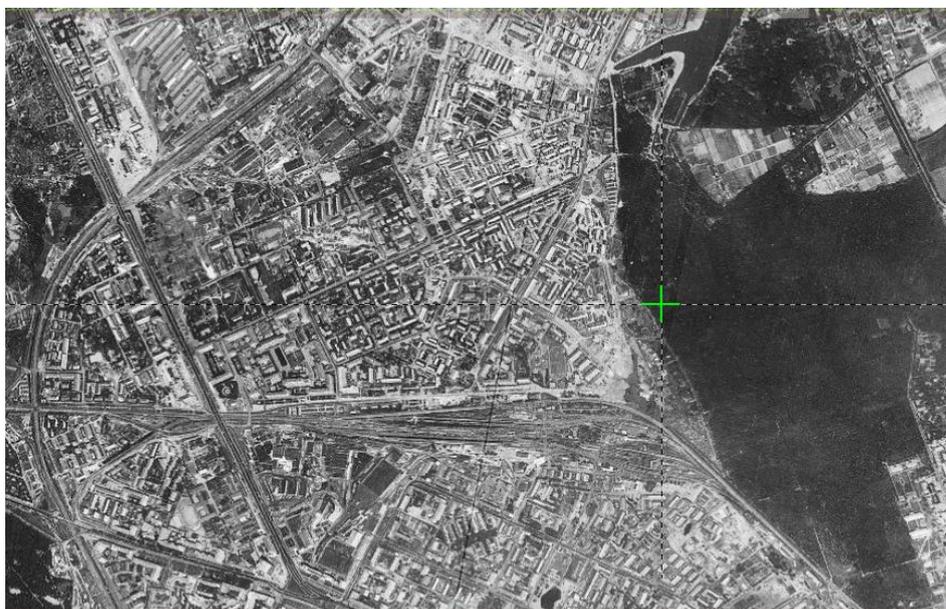


Рисунок 2.5. – Территория ЛОД на американском аэрофотоплане, снятом в 1966 году. Оригиналы находятся в архиве Американского Геологического общества (U.S. Geological Survey National Center). (Источник - <http://retromap.ru>)

В настоящее время из-за развития жилищного строительства рекреационная нагрузка на ЛОД постоянно возрастает (Яшин,2016).

Рельеф. Территория МСХА им. К.А. Тимирязева находится на окраине южного склона Клинско-Дмитровской гряды, которая спускается на юг вдоль до долины реки Москвы и проходит далеко на запад. На востоке этот южный участок гряды граничит с западным участком мещерской низменности. Рельеф территории университета представляет собой мореную холмистую равнину, слагающую центральную часть водораздела между р. Москвой и Яузой (Наумов, 2009).

Территория МСХА расположена на четырёх моренных холмах, вершины которых приурочены к следующим пунктам: Лихоборский бугор (160 м), Главное здание университета, 171,2м, Лесная опытная дача (175,0). ЛОД расположена на самом высоком в пределах территории ТСХА плоском водораздельном моренном холме с очень пологим склоном на юго-запад и более крутым склоном на северо-восток. Наиболее высокая часть этого холма (175 метров над уровнем моря) находится посередине берёзовой аллеи, на просеке между 7 и 11 кварталами. Самая низкая (160 м над уровнем моря) находится в северной части дачи на территории 1-го и 3-го квартала – на берегу большого академического пруда и в конце лощины в 3-м квартале, по дну которой протекает река Жабенка. Таким образом, наибольшая разница в высотах на территории ЛОД составляет 15 метров.

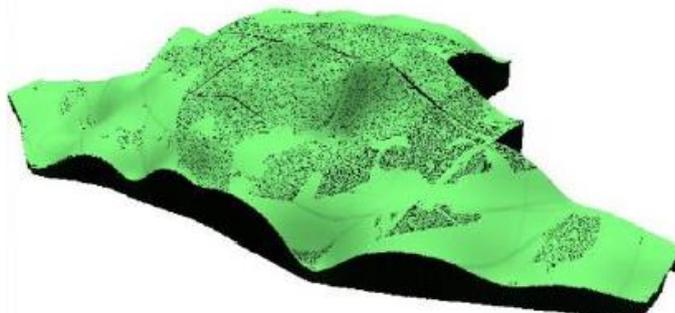


Рисунок 2.6. - Рельеф лесной опытной дачи (выполнен Д. Грачёвым, цит. по Наумову)

Климат территории РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева умеренно-континентальный. Абсолютный минимум температуры воздуха составляет -42С, а абсолютный максимум + 37С. Поздние заморозки нередко отмечаются в июне, а в мае бывают снегопады и гололед. Снежный покров на ЛОД достигает 34-42 см. За последние сорок лет в Москве интегральный коэффициент прозрачности атмосферы снизился на 4%, балл общей облачности увеличился на 10%, а нижней - на 17%. При этом количество осадков увеличивается на 190-240 мм. Наибольшее количество осадков выпадает в августе и октябре, наименьшее приходится на апрель. В настоящее время из-за увеличения числа автомобилей в городе отмечено существенное увеличение общей минерализации осадков и содержание в них сульфатов. (Яшин,2016).

Хотя увеличение суммы осадков в вегетационный период положительно влияет на рост древесных растений, вследствие неровности рельефа, большого количества понижений, создаются условия, при которых растения страдают от избытка влаги. При этом площадь переувлажнённых участков с каждым годом растёт (Наумов, 2009).

Лиственница сибирская

Для проведения древесно-кольцевого анализа был выбран вид *Larix sibirica* (рис 2.7), поскольку он является единственным представителем хвойных листопадных деревьев, у которых хвоя прошлых лет не принимает участия в фотосинтезе, в результате чего она не оказывает существенного влияния на прирост древесины текущего года роста дерева. (Шиятов, 2000). Кроме того, лиственница имеет наиболее высокий среди хвойных деревьев коэффициент чувствительности и обладает большой отзывчивостью прироста на изменение внешних условий (Шиятов, 1986).

Лиственница (*Larix*)- род хвойных летнезелёных деревьев, входящих в семейство сосновых. Деревья однодомные, как правило крупные, высота достигает 35—50 м, диаметр - до 1,0 м.



Рисунок 2.7. – Взрослое дерево *Larix sibirica* (источник planetarium.ru)

Молодые деревья обладают сравнительно тонкой, мелкотрещинноватой, буроватой корой. Кора старых деревьев обладает толстой (до 10-20 см) коркой, которая хорошо защищает их от огня. Она значительно темнее, красная на изломе, с глубокими продольными трещинами. Крона молодых деревьев яйцевидно-конусовидная, в старом возрасте становится раскидистой с горизонтальными длинными сучьями, с обычно приподнятыми концами ветвей (Будайчиев, 2006).

Лиственницы обладают узкой, линейной, мягкой хвоей, длинной, как правило 3—4 см, шириной 1—1,5 мм. Продуктивность фотосинтеза у хвои лиственниц в 1,5—2 раза больше, чем хвоя ели и сосны. Главную роль в строении кроны и физиологических функциях дерева играет пучковая хвоя на долю которой приходится до 90% общей массы хвои. По сравнению с другими хвойными деревьями, хвоя лиственниц обладает относительно большой газоустойчивостью благодаря её ежегодной смене. Это делает её перспективной породой для озеленения городов и формирования лесопарковых ландшафтов (Будайчиев, 2006) .

«Цветки» возникают одновременно с хвоей ранней весной. Мужские «соцветия» (колоски, или микростробилы) овально-шаровидные, желтоватые,

состоящие из многочисленных тычинок, несущих пыльцу, не имеющую воздушных мешков и разносящуюся недалеко. Женские «соцветия» (рисунок 2.8) (шишечки, или макростробилы) продолговатые, красные, розовые, зелёные, расположены вертикально, состоят из спирально расположенных на общем стержне чешуек.



Рисунок 2.8 – Женское соцветие *Larix sibirica* (planetarium.ru)

Ветроопыляемы, оплодотворение наступает через месяц после опыления. При развитии шишечки наружные кроющие чешуи, которые необходимы для улавливания пыльцы, почти не увеличиваются, а внутренние (семенные), разрастаются и древеснеют, а в зрелой шишке превосходят наружные. Созревание шишек наступает осенью, раскрываются они тогда же или зимой и рассеивают свои крылатые семена на большие расстояния. После рассеивания семян шишки могут сохраняться на дереве до нескольких лет. В чистых сомкнутых древостоях возрастом около 60—100 лет получают семена наилучшего качества. Плодоносить лиственницы начинают с 15—25-летнего возраста и продолжают до старости с интервалами в 3—5 лет.

Лиственница обладает сильно разветвлённой, глубокой корневой системой с хорошо развитым стержневым корнем. Её строение в значительной мере обусловлено особенностями почвы: так, в районах вечной мерзлоты корневая

система породы зачастую поверхностная, а на заболоченных территориях образуются придаточные корни.

Лиственница является светолюбивым, быстро растущим, не требовательным к температуре деревом. Требования к почве умеренные, но успешнее всего растет на дренированных мощных супесчаных и суглинистых почвах с невысоким уровнем залегания грунтовых вод. Благодаря развитой корневой системе, обладает высокой устойчивостью к ветру (Мартынов, 2008).

Несмотря на то, что представители рода *Larix* весьма неприхотливы, существует угроза, что сосна вытеснит лиственницу из традиционных мест обитания. При таянии многолетнемерзлых почв повышается ее влажность, что часто приводит к заболачиванию. Переизбыток влаги в почве негативно сказывается на деревьях и вызывает изменение видового состава в лесах. Лиственничные леса чувствительнее, чем сосновые, к недостатку кислорода в переувлажненной почве. Сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris*) замещает лиственницу (*Larix sibirica*) в лесотундре и северной тайге, где расширение ее ареала на север происходит в связи с деградацией многолетней мерзлоты, вызванной потеплением, а также в горах, где сосна занимает пространства, ранее занятые лиственницей (Urban, 2019).

Благодаря тому, что лиственница сибирская хорошо переносит условия города, ее часто используют для озеленения в одиночных и групповых посадках.

2.2. Методы исследования

Керны отбирались с двух учётных площадей, в разной степени подверженных урбанизации. Микроклиматические условия ЛОД можно считать близкими к лесным, микроклиматические условия Лиственничной аллеи – городскими. Схема отбора кернов приведена на рисунке 2.9.

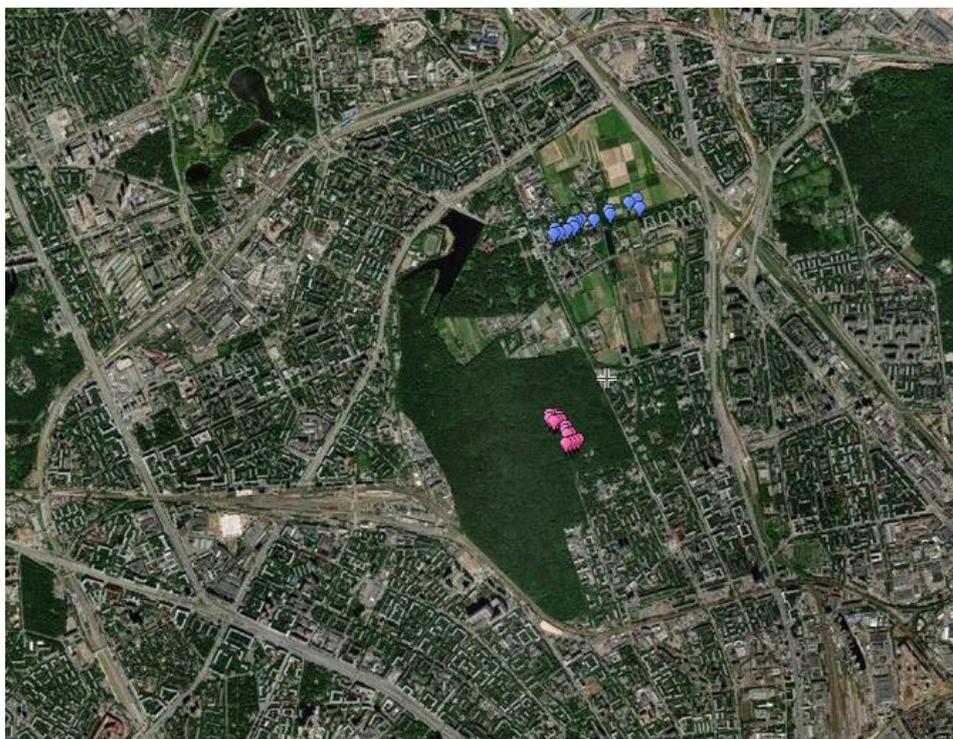


Рисунок 2.9. – Схема отбора кернов на территории РГАУ –МСХА им.
К.А. Тимирязева

Взятие образцов древесины производилось возрастным буром Пресслера, при помощи которого высверливались радиальные керны древесины диаметром 5 мм и длиной до 50 см. Образцы древесины отбирались перпендикулярно продольной оси ствола дерева на высоте 1,3 м от поверхности земли. С каждого дерева было отобрано по два керна с разных сторон окружности ствола. Для построения одной обобщенной хронологии отбирали образцы древесины с 15 деревьев на каждом участке.

Высверленные керны (рисунок 2.10) помещали в бумажные контейнеры для транспортировки, сушки и хранения до проведения работ по датировке и измерению колец.



Рисунок 2.10. – Древесный керн

Дальнейшая работа с образцами древесины проводилась в лабораторных условиях. Керна наклеивались на деревянную подложку, которая представляет из себя рейку прямоугольной формы шириной 1 см и длиной чуть больше самого керна. Далее на боковые поверхности деревянной основы наносился шифр образца для исключения ошибки в идентификации образцов. Затем керн полировали с помощью шлифовальной бумаги различной зернистости (Orvis et al., 2002, Соломина 2012).

Керна сканировались на сканере с разрешением 600 dpi. Затем на увеличенном изображении керна проводилась предварительная датировка и маркировка годичных колец. Зная точное календарное время взятия образца и формирования на нем подкорового кольца прироста, методом обратного отсчета определялись календарные даты образования всех колец этой серии (Соломина, 2019).

Измерение ширины годичных колец проводилось в программе R-studio при помощи пакета MtreeRing (рис.2.10) (Shi, J., 2019).

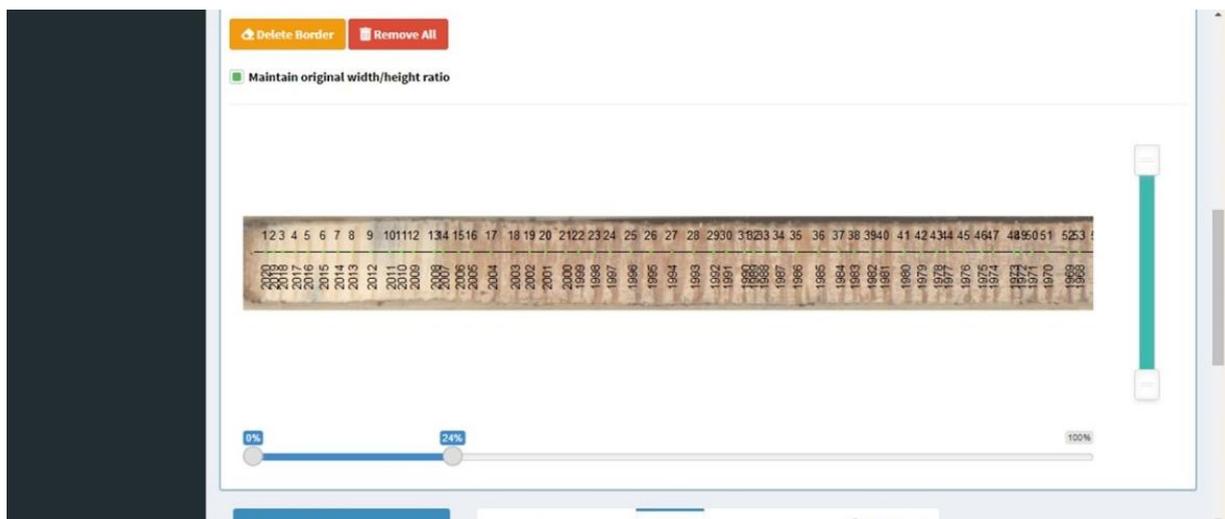


Рисунок 2.10. – Датировка кернов в пакете MtreeRing

Окончательная датировка колец проводилась с помощью метода перекрестной датировки, который представляет собой сравнение рисунков колец у различных деревьев (рисунок 2.11) и выбор точного места, где найдено соответствие в характере изменчивости показателей прироста между рассматриваемыми образцами (Douglass, 1919).

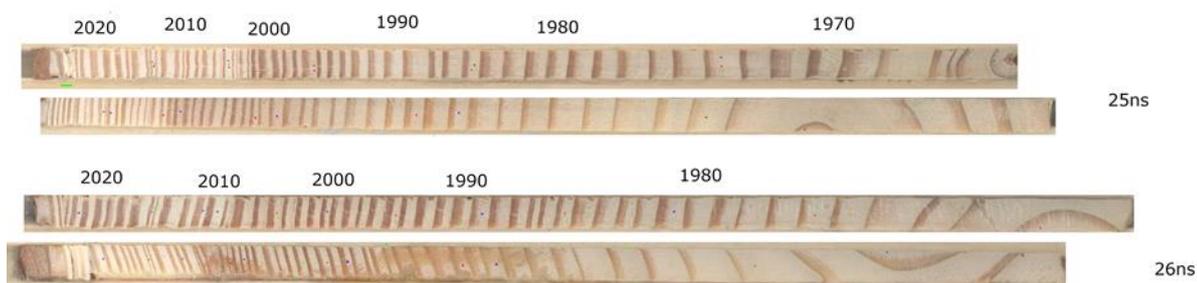


Рисунок 2.11. – Сравнение рисунков годичных колец на разных кервах

Этот метод основан на том, что в районе с климатически однородными условиями деревья одного вида, как правило, показывают достаточно синхронное изменение ширины годичных колец. Чередование узких и широких колец неповторимо во времени, поэтому совместить графики изменения ширины годичных колец у сравниваемых образцов можно лишь в пределах строго определенного участка дендрохронологической шкалы (Douglas, 1919, Solomina, 2012). Перекрёстное датирование позволяет выявлять нарушение синхронности

в пределах отдельных временных интервалов и тем самым выявлять точное положение ложных и выпавших колец. (Радченко, 2019).

Правильность датировки проверялась при помощи пакета `dplr` в программе R-studio. Функция `Corr.rwl.seg` отображает каждый сегмент. Эта функция показывает на корреляцию между сегментом керна и мастером хронологии, построенным через усреднение остальных кернов в объекте `rwl`. Каждая серия показана и раскрашена в соответствии с ее соотношением с мастером. Сегменты окрашены в соответствии с силой корреляции между этим сегментом и основной хронологией. Сегменты, окрашенные синим, хорошо коррелируют (р-значения меньше или равны установленному пользователем критическому значению), красные – являются индикаторами проблем с датировкой (р-значения больше, чем критическое значение) (Bunn, 2008). Пример применения функции можно видеть на рисунке 2.12.

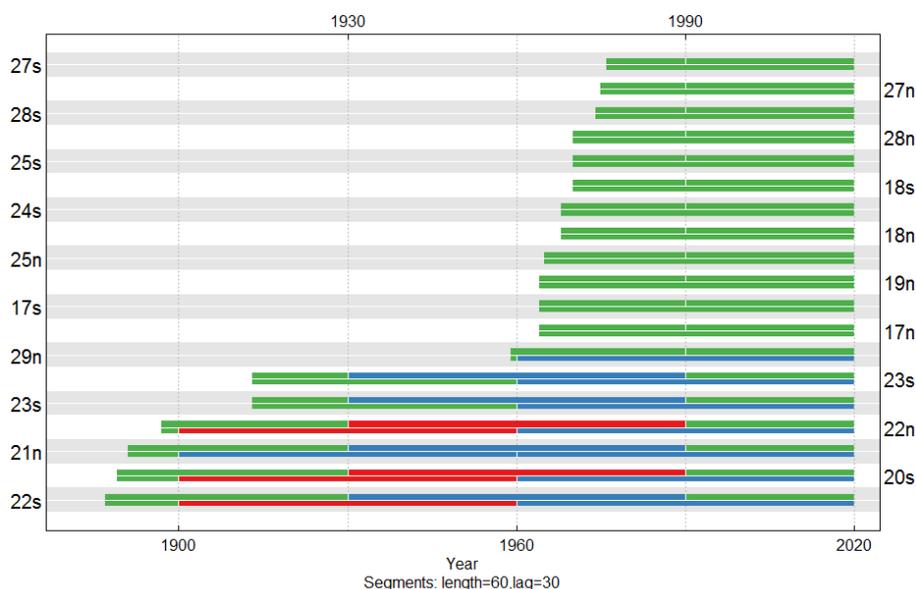


Рисунок 2.12. Пример применения функции `corr.rwl.seg`

При обнаружении проблем с датировкой образец подвергался дополнительной проверке, и замеры ширины колец корректировались.

Биологические тренды и индексирование серий

Абсолютные значения прироста древесины зависят от разных факторов (возрастные изменения, конкурентные взаимоотношения, механические

повреждения деревьев и т. д.), поэтому для сопоставимости приростов у разных образцов абсолютные значения ширины и плотности колец переводят в относительные. Особенно существенный вклад «неклиматической» природы в изменчивость ширины и плотности колец вносит возрастной тренд, так как прирост у молодых деревьев, при прочих равных условиях, больше, чем у старых (Соломина, 2012).

Исключения или явного снижения влияния перечисленных факторов можно добиться с помощью стандартизации или индексирования (Fritts, 1976).

Суть метода состоит в том, что индивидуальный ряд ширины годовых колец представляют как линейно-агрегированную совокупность временных компонент:

$$R_t = A_t + C_t + \delta D1_t + \delta D2_t + E_t, \quad (2.1)$$

где R_t — ширина годового кольца для календарного года t ; A_t — возрастной тренд; C_t — климатическая компонента; $D1_t$ — отклонения в росте, обусловленные эндогенными факторами; $D2_t$ — отклонения в росте, обусловленные экзогенными факторами неклиматической природы (пожары, насекомые и др.); E_t — изменчивость, не учтенная перечисленными выше компонентами; δ — коэффициент, учитывающий действие эндо- и экзогенных факторов на данном временном интервале (т. е. $\delta = 1$ или 0) (Радченко, 2019).

Ввиду сложности определения A_t , $D1_t$ и $D2_t$ возрастной тренд практически оценивается как некоторая функция трех компонент:

$$G_t = f(A_t, \delta D1_t, \delta D2_t) \quad (2.2)$$

На практике при увеличении ширины годовых колец увеличивается и среднеквадратичное отклонение, поэтому стандартизация или индексирование ряда абсолютных величин выполняется делением ширины годового кольца на его теоретическое значение, оцениваемое G_t :

$$I_t = \frac{R_t}{G_t}, \quad (2.3)$$

где I_t — индекс годового кольца, R_t — ширина годового кольца для календарного года

Полученные ряды будут иметь одинаковые средние и статистически равные дисперсии. У каждого такого ряда в значительной степени исключены индивидуальные особенности радиального роста дерева и сохранена общая для данной совокупности деревьев изменчивость (сигнал) (Соломатина, 2012).

Оценка качества полученных хронологий

Для оценки качества дендрохронологических рядов коэффициент чувствительности и показатель EPS (Expressed Population Signal) (Briffa, 1995).

Коэффициент чувствительности оценивает величину межгодовой изменчивости прироста. (Cook and Kairiukstis, 1990). Чем выше коэффициент чувствительности, тем более сильный климатический сигнал содержится в древесно-кольцевых хронологиях. Он вычисляется путем нахождения абсолютного значения разности соседних значений ширины колец, деленной на их среднюю величину по формуле:

$$K_s = \frac{1}{n-1} \sum_{t=1}^{n-1} \frac{2(x_{t+1} - x_t)}{(x_{t+1} + x_t)}, \quad (2.4)$$

где x_t - ширина годичного кольца, или индекс прироста в год t , n - длительность ряда (число лет) (Тишин, 2018).

Серия колец считается чувствительной, когда средний коэффициент чувствительности больше 0.3 (Ferguson, 1969)

Надежность хронологии оценивалась с помощью индекса EPS (Expressed Population Signal). EPS определяет, насколько хорошо реальная хронология, полученная из ограниченного количества образцов, отражает гипотетическую, представленную неограниченным числом деревьев (Wigley et al., 1984).

$$EPS = \frac{t r_{bt}}{t r_{bt} + (1 - r_{bt})}, \quad (2.5)$$

где t – количество деревьев; r_{bt} - среднее значение коэффициента корреляции между отдельными сериями

При значениях $EPS \geq 0.85$ хронология считается достаточно представительной (Briffa, Jones, 1990).

Выявление климатического сигнала в древеснокольцевых хронологиях

Для определения статистических связей между различными климатическими параметрами и индексами древесно-кольцевых хронологий использовался корреляционный анализ.

Для оценки связей между хронологиями использовался коэффициент синхронности. Коэффициент синхронности оценивает число однонаправленных изменений от года к году между двумя хронологиями и рассчитывается по следующей формуле:

$$Kc = n^+ \times 100 / n - 1, \quad (2.6)$$

где n^+ - количество совпавших по направлению годичных отрезков кривой, n - длительность сравниваемого интервала времени (в годах).

Для оценки реакции деревьев на экстремальные погодные явления (засуха, переувлажнение, низкие зимние температуры, бесснежные зимы) использовался анализ наложенных эпох. Он показывает отклонения от средних значений RWI за указанные годы перед каждым годом события, годом события и указанными годами сразу после каждого события усредненные к наложенной эпохе (Lough, 1987, Bunn, 2008).

Для выявления цикличности роста деревьев использовался спектральный анализ на основе вейвлет-преобразования. Вейвлет отображает спектрально-временные характеристики временного ряда на частотно-временную плоскость (временной период). При преобразовании используется окно переменного размера, сужающееся при фокусировке на мелкомасштабных или высокочастотных характеристиках сигнала, и расширяющееся при фокусировке на крупномасштабных или низкочастотных функциях как зум-объектив.

ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

3.1. Оценка возрастного тренда

Для анализа в ноябре 2020 года было отобрано 60 кернов с деревьев возрастом от 30 до 148 лет. Характеристика отобранных образцов приведена в таблице 3.1.

Таблица 3.1.

Возраст древесных насаждений

Площадка	Возраст, лет		Среднегодовой прирост, мм	
	Минимальный	Максимальный	Средневозрастные деревья	Перестойные деревья
Лиственничная аллея	30,00	148,00	3,10	1,46
ЛОД	45,00	138,00	2,05	1,55

По отобранным образцам строились графики абсолютных значений радиального прироста (рис 3.1, рис 3.2).

Одним из основных критериев для оценки воздействия природных и антропогенных факторов на древостой служит текущий прирост по запасу (Лиёпа, 1980). На абсолютные значения радиального прироста древесины влияет множество различных факторов, таких как возрастные изменения, конкурентные взаимоотношения, механические повреждения деревьев и т. д. Наиболее существенный вклад «неклиматической» природы в изменчивость ширины годичных колец вносит возрастной тренд, поскольку прирост у молодых деревьев, при прочих равных условиях, больше, чем у старых (Соломина, 2012).

Анализируя динамику абсолютных значений радиального прироста, можно отметить, что деревья, выросшие на Лиственничной аллее (рисунок 3.1) имеют более чётко выраженный возрастной тренд: с увеличением возраста происходит снижение радиального прироста.

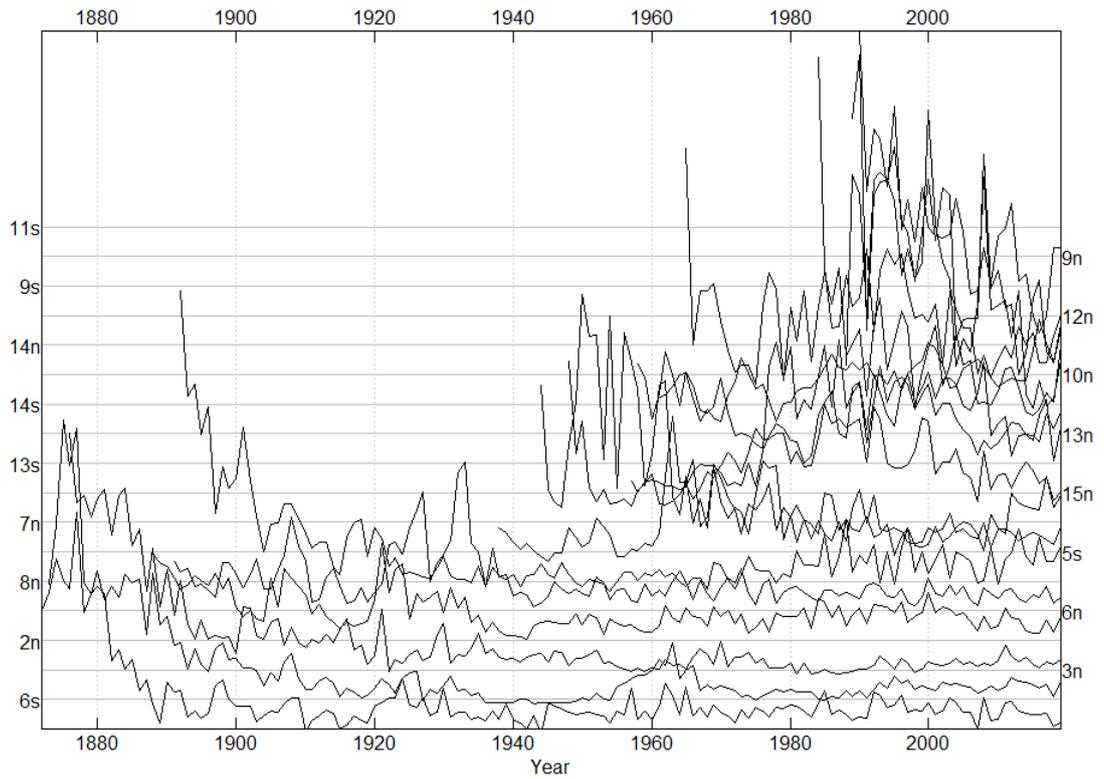


Рисунок 3.1. Абсолютные значения радиального прироста 15 модельных деревьев лиственницы сибирской на Лиственничной аллее

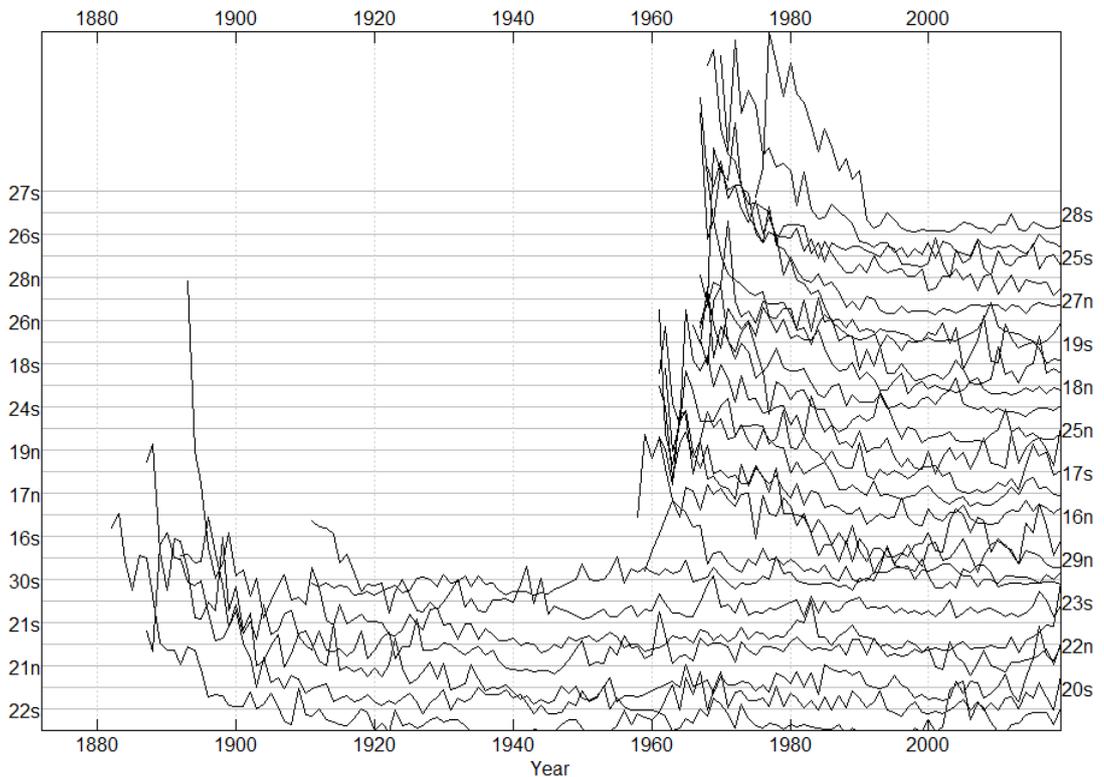


Рисунок 3.2. Абсолютные значения радиального прироста 15 модельных деревьев лиственницы сибирской на Лесной опытной даче

Это так же подтверждается корреляционным анализом. Коэффициент корреляции между возрастом и среднегодовым приростом в ЛОД -0,35 (при $p = 0.08$), на Лиственничной аллее – 0,94 (при $p < 2.2 \cdot 10^{-16}$).

Эта закономерность может быть связана с длительным рекреационным воздействием на древесные насаждения, приводящим к снижению прироста, как следствие к ослаблению деревьев.

Кроме того, менее интенсивный прирост деревьев ЛОД на начальном этапе онтогенеза обусловлен более сильной конкуренцией за свет в лесном фитоценозе. При разной степени пропуска света взрослые деревья, затеняющие подрост, обгоняют и подавляют конкурентов. Недостаток освещенности может приводить к опадению ветвей и листьев, замедлению роста и развития.

3.2. Оценка чувствительности и синхронности дендрохронологических рядов

Для количественной характеристики годичных колебаний прироста древесных растений наиболее часто используются коэффициент чувствительности (КЧ) и коэффициент синхронности (КС). Коэффициент чувствительности дает оценку относительных различий в ширине (или индексе прироста) соседних колец, т.е. показывает степень воздействия в основном внешних факторов на изменение величины прироста. Коэффициент синхронности показывает интенсивность общих факторов по отношению к рассматриваемым временным рядам.

Значения коэффициентов чувствительности и синхронности приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2

Значение коэффициентов синхронности и чувствительности

	Участок в целом		Средневозрастные деревья		Перестойные деревья	
	ЛА	ЛОД	ЛОД	ЛА	ЛОД	ЛА
КЧ	0,33	0,31	0,29	0,40	0,33	0,49
КС	79	55	59	69	78	63

Для оценки уровня синхронности использовалась шкалой Шиятова, разбитой на пять классов через равные промежутки (Таблица 3.3)

Таблица 3.3.

Шкала коэффициентов синхронности (Шиятов, 1986)

Значения коэффициента синхронности	Уровни синхронности между хронологиями
45-56	Отсутствует
57-67	Низкая
68-78	Средняя
79-89	Высокая
90-100	Очень высокая

Согласно данной шкале синхронность в обобщённом ряду по городским деревьям – высокая (79%), по лесу – синхронность отсутствует (55%).

Если рассматривать отдельно средневозрастные и перестойные деревья, то мы увидим, что у средневозрастных деревьев на Лиственничной аллее синхронность прироста – средняя (69%), у средневозрастных деревьев на ЛОД синхронность – низкая (59%). У перестойных деревьев на Лиственничной аллее синхронность низкая (63%), на ЛОД – средняя (78%).

Значительную роль в лесных биогеоценозах играют биотические факторы, уменьшающие влияние климатических условий на прирост деревьев. Поэтому в динамике радиального прироста деревьев фиксируется не только многолетняя изменчивость климатических параметров, но и отражаются результаты внутри- и межвидовой конкуренции (Тишин, 2018).

Сравнительно низкие значения коэффициента синхронности могут означать наличие интенсивного разделения деревьев в пределах отдельных рангов доминирования. Наиболее сильная конкуренция обычно наблюдается в наиболее комфортной для растений среде. В благоприятных условиях древесные растения быстрее растут, у них раньше начинаются процессы смыкания крон, выделения и отмирания угнетённых экземпляров (Сукачёв, 1953).

Коэффициент чувствительности. Коэффициент чувствительности может колебаться в пределах от 0 до 2. Серия колец считается чувствительной, когда средний коэффициент чувствительности больше 0,3 (Ferguson, 1969).

Расчёты показали, что деревья Лиственничной аллеи обладают несколько большей чувствительностью по сравнению с деревьями ЛОД – 0,33 и 0,31. Однако, если рассматривать по отдельности перестойные и средневозрастные деревья, то получается, что самой высокой чувствительностью обладают перестойные деревья на Лиственничной аллее – 0,49, в то время как на ЛОД это значение – 0,33. Средневозрастные деревья на ЛОД обладают низким коэффициентом чувствительности (0,29), для средневозрастных деревьев Лиственничной аллеи это значение -0,40.

3.3. Анализ климатического отклика

Индексирование серий. Дерево в первые годы своей жизни наиболее устойчиво к недостатку тепла, света и влаги, поэтому растёт наиболее интенсивно. В последствии абсолютный годовой прирост снижается и с возрастом может быть описан как отрицательная экспоненциальная кривая (Соломина, 2012).

Для нивелирования почвенных и возрастных факторов используется стандартизация или индексирование (Fritts, 1976). Чтобы сделать приросты различных образцов сопоставимыми, абсолютные значения ширины колец переводят в относительные (Соломина, 2012).

Обобщённая индексированная хронология получалась усреднением индивидуальных древесно-кольцевых хронологий радиального прироста (Cook, 1985). Построенные после индексирования обобщённые хронологии приведены на рисунках 3.3-3.4.

Анализ графика индексированных величин прироста условно можно разделить на две части: анализ насаждений, слабо подверженных воздействию урбанизации (до 1960-х гг.) и анализ изменений, произошедших вследствие строительства вокруг территории РГАУ-МСХА многоэтажных жилых домов.

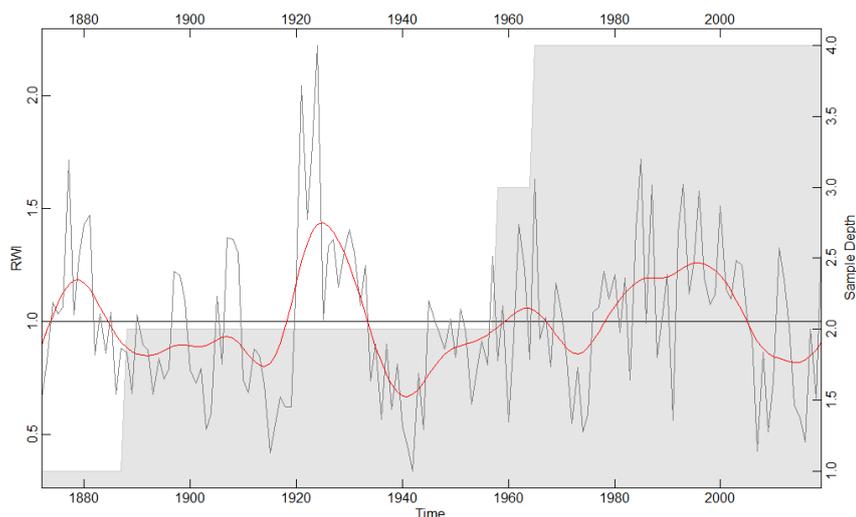


Рисунок 3.3 - Обобщённая хронология по Лиственничной аллее

Насаждения ЛА сильнее отражают воздействие урбанизации. На графике четко прослеживается нарушение цикличности радиального прироста, резкие спады и всплески прироста, резкое падение прироста в 1970-х годах.

Минимальные показатели прироста отмечены в 1915(0,41), 1919(0,61), 1942(0,33), 1972(0,54), 1974(0,51), и 2016(0,46) году.

Максимальные показатели прироста наблюдаются в 1880 (1,42), 1881 (1,47), 1921 (2,04), 1923(1,78), 1924 (2,22), 1962 (1,42), 1965 (1,63), 1984 (1,40), 1985(1,71) и 1987(1,60) году.

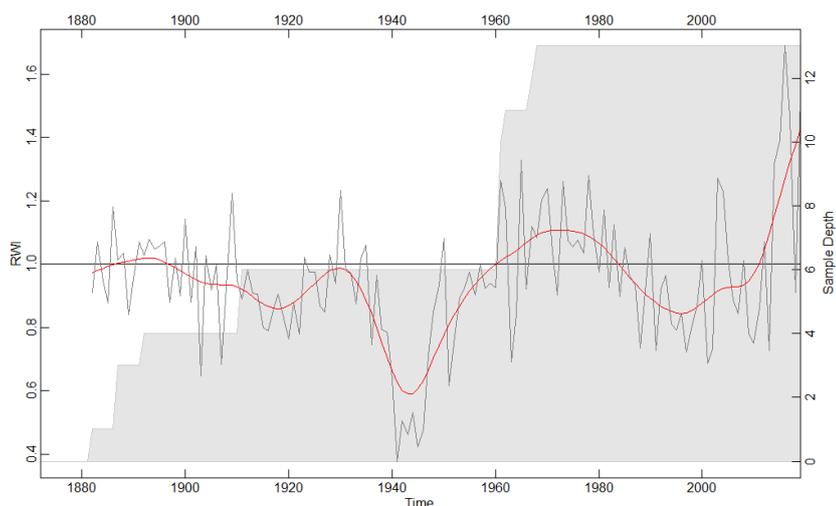


Рисунок 3.4 - Обобщённая хронология по ЛОД

На графике четко прослеживается разница динамики колебаний. Насаждения ЛОД с 1960-х годов не изменили свою динамику. Прослеживается относительно равномерная амплитуда колебаний прироста, четко выражены «реперные» годы.

Минимальные показатели прироста отмечены в 1910 (0,76), 1941 (0,37), 1945(0,42), 1991(0,72), 1997(0,72).

Максимальные показатели прироста наблюдаются в 1909 (1.22), 1930 (1,23), 1961(1.26), 2003 (1.27), 2016 (1,68).

3.3.2. Корреляционный анализ

Для выявления лимитирующих факторов рассчитаны коэффициенты корреляции индексов прироста с атмосферными осадками и суммой активных температур.

Метеоданные для анализа влияния климатических параметров на скорость прироста древесины *Larix sibirica* были взяты на метеостанции им. Михельсона РГАУ МСХА им. К.А. Тимирязева. Динамика суммы активных температур и суммы осадков приведена на рисунках 3.5.-3.6.

Сумма активных температур на территории Московской области составляет 1800-2200°C. Вегетационный период длится около 170 дней.

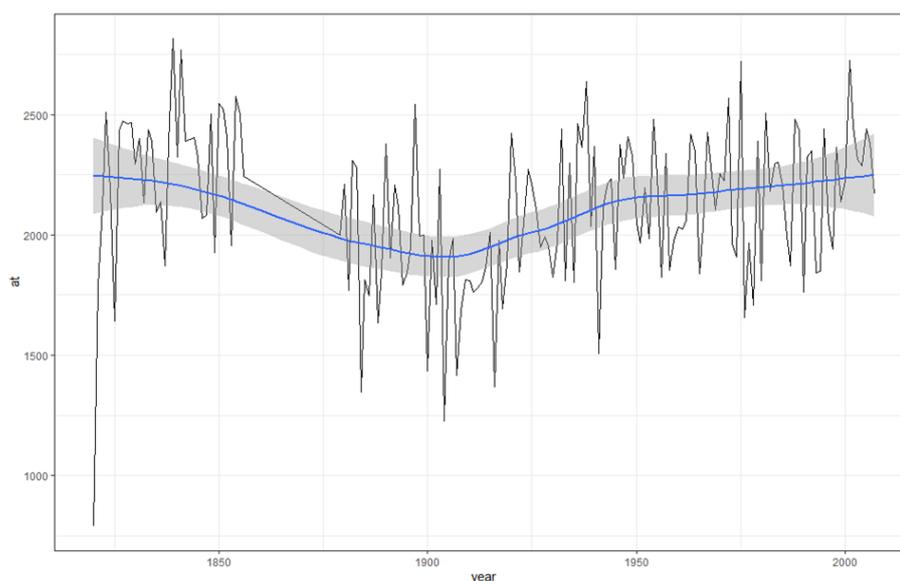


Рисунок 3.5. – Динамика суммы активных температур по данным метеостанции им. Михельсона

Из-за физиологических причин на прирост текущего года, как правило, оказывают влияние климатические условия предыдущих 2–3 (а иногда и более) лет (Fritts, 1976), поэтому для анализа климатического отклика использовалась корреляция с движущимся окном с шагом в 10 лет.

Территория Московской области относится к зоне с избыточным увлажнением (коэффициент увлажнения – 1,2). Средняя норма осадков для Москвы составляет 650 мм.

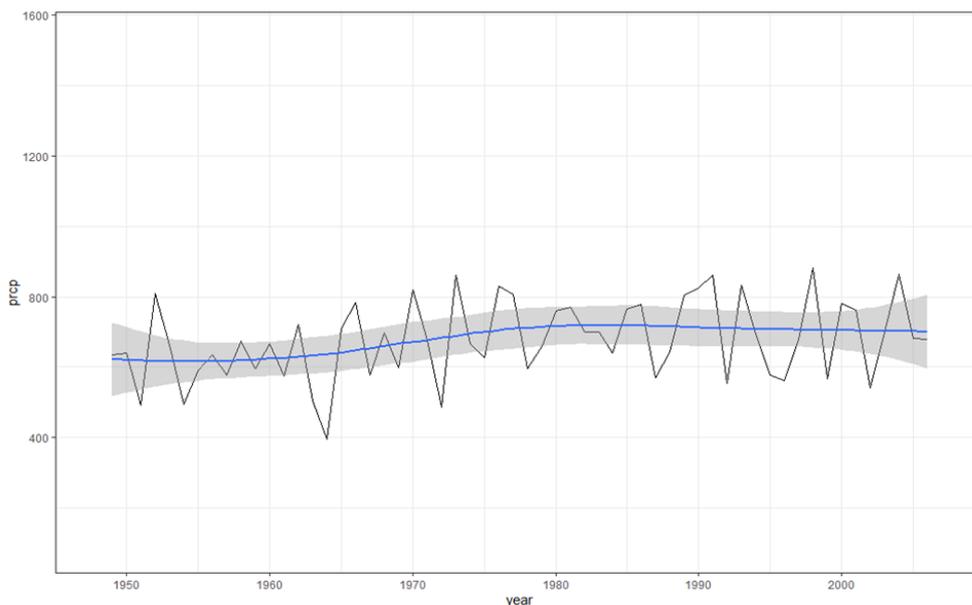


Рисунок 3.6. – Динамика суммы осадков по данным метеостанции им. Михельсона

Корреляция с суммой активных температур

Для благополучного прохождения всех фенофаз, включая опадание хвои, необходимое для подготовки к зиме, лиственнице требуется сумма активных температур не менее 1900°. В зависимости от погодных условий даты прохождения фенологических фаз могут варьировать, однако потребность в накоплении суммы положительных температур воздуха остаётся неизменной. (Карбасникова, 2020).

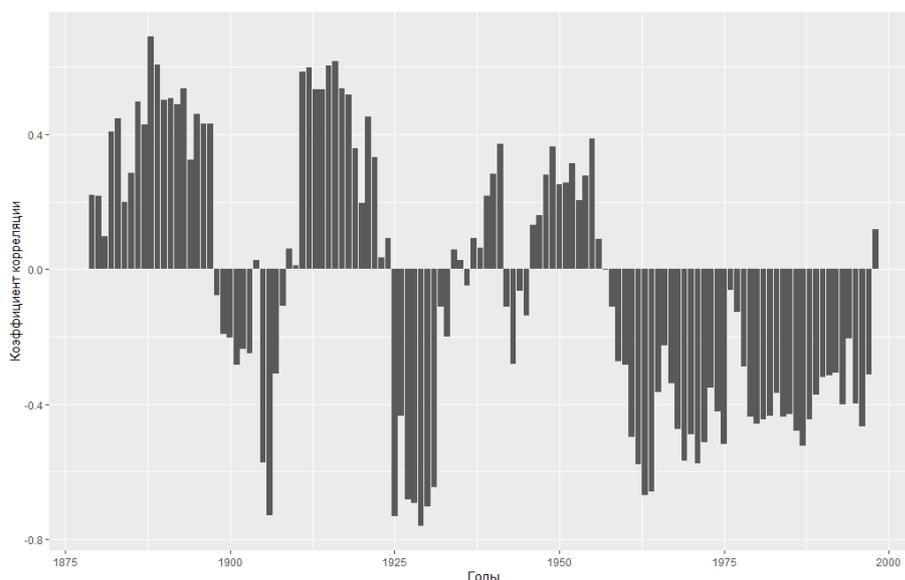


Рисунок 3.7. – Значения корреляции прироста с суммой активных температур для Лиственничной аллеи

На рисунке 3.7. представлены результаты корреляционного анализа прироста с суммой активных температур для Лиственничной аллеи. Отрицательная корреляция с суммой активных температур наблюдалась с 1897 до 1907, с 1925 по 1934, и с 1957 до 1997 года. Положительная корреляция отмечена для промежутков с 1879 до 1897, с 1910 до 1924, с 1934 до 1956 года.

Рассмотрим подробнее годы «перелома». Переход от положительной корреляции к отрицательной происходил при похолодании в 1898 (сумма активных температур упала по сравнению с предыдущим годом до 1995), в 1925 после увеличения суммы активных температур до 2211, в 1957 при возрастании суммы активных температур до 2337.

Таким образом, мы видим, что во всех случаях угнетение начиналось при увеличении температуры выше оптимума.

На рисунке 3.8. представлены результаты корреляционного анализа прироста с суммой активных температур для ЛОД. На протяжении почти всего периода наблюдений отмечается отрицательная корреляция с суммой активных температур. Исключением стали только промежутки с 1904 до 1910, с 1913 до 1918 и с 1931 до 1951.

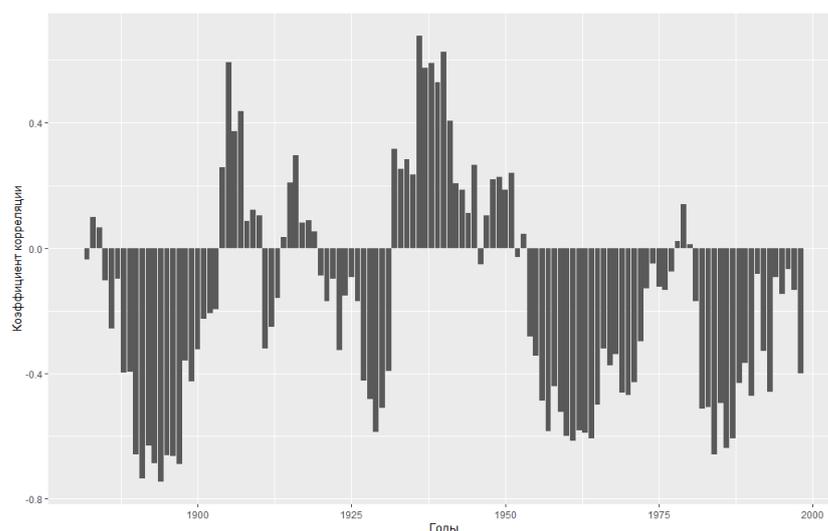


Рисунок 3.8. – Значения корреляции прироста с суммой активных температур для ЛОД

На этом участке «переломные» годы расположены несколько иначе, чем на Лиственничной аллее. Переход к отрицательной корреляции происходил в 1885 (сумма активных температур выросла по сравнению с предыдущим годом и составила 1812), при похолодании в 1911 (сумма активных температур снизилась до 1764), в 1920 (сумма активных температур выросла до 2421), в 1952 (сумма активных температур увеличилась и составила 2196) и в также более тёплый по сравнению с предыдущим 1981 год (сумма активных температур 2505).

На обоих участках наблюдается угнетение роста при увеличении температуры выше оптимума. Высокие температуры могли вызвать температурную депрессию фотосинтеза. Влияние высокой температуры вызывает уменьшение устьичной проводимости, что, в свою очередь, снижает парциальное давление CO_2 внутри листа и изменяет растворимость CO_2 и O_2 , приводя к увеличению фотодыхания (Pons, Welschen, 2003).

Также стоит отметить, что «переломные» годы отличаются в разных местообитаниях: до 1920 годов графики являются зеркальным отражением друг друга.

Корреляция с суммой осадков

Лиственница является деревом, предпочитающим умеренное увлажнение, однако крайне чувствительным по отношению к недостатку кислорода в почвенном воздухе (Urban, 2019). Результаты корреляционного анализа прироста с суммой осадков приведены на рисунках 3.9-3.10.

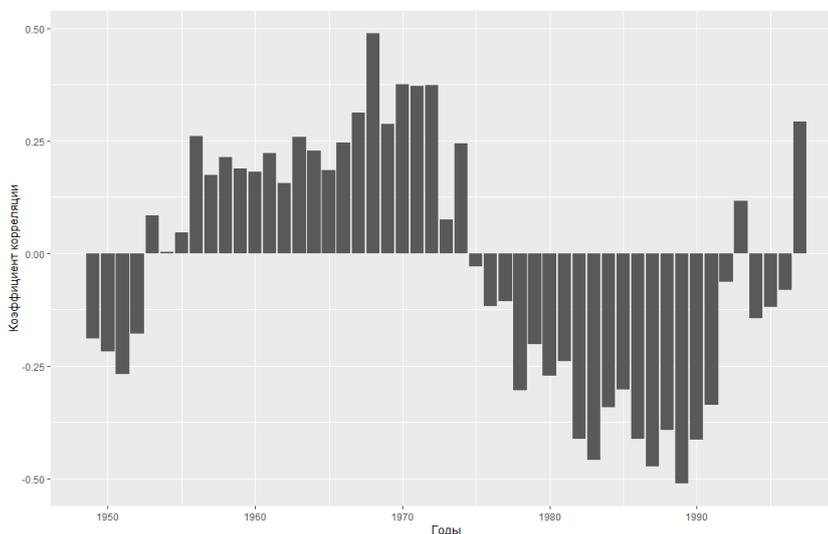


Рисунок 3.9 – Значения корреляции прироста с суммой осадков для Лиственничной аллеи

Переход к отрицательной корреляции фиксируется в 1975 и 1994. В 1975 наблюдался некоторый дефицит осадков (626,7 мм), за которым последовал период с избыточным увлажнением. Годы 1994-1996 были засушливыми.

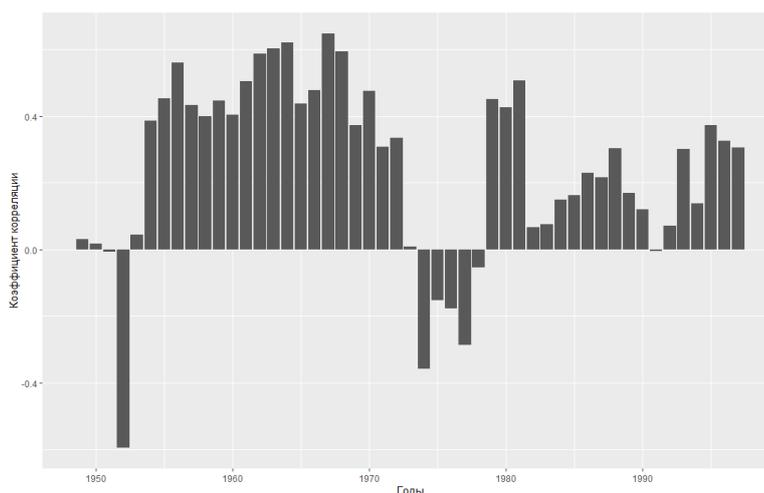


Рисунок 3.10 Значения корреляции прироста с суммой осадков для ЛОД

Практически на всем протяжении наблюдений мы видим положительную корреляцию с осадками. Исключением стал только 1952 год (коэффициент корреляции -0,59). В этот год выпало 808,6 мм. осадков.

Отрицательной также была корреляция в переувлажнённые (средняя годовая сумма осадков 708,8 мм) 1974-1978 годы.

Потребность в осадках для камбиальной деятельности обусловлена запасами влаги в стволе, её расходом на различные физиологические процессы, включая транспирацию (Ваганов, Терсков, 1977). Корреляционный анализ показывает, что прирост деревьев на обоих участках отзывчив на осадки, однако переувлажнение может быть лимитирующим фактором. В городских условиях деревья чувствительнее к переувлажнению.

3.3.2. Анализ наложенных эпох

Для проверки значимости реакции на погодные аномалии был использован анализ наложенных эпох. Он показывает отклонения от средних значений RWI за несколько лет перед событием, годом события и указанными годами сразу после каждого события усредненные к наложенной эпохе.

Засушливые годы. Из-за внутреннего дефицита воды, возникающего в результате засухи, происходит замедление роста деревьев. Дефицит воды также неблагоприятен для большинства физиологических процессов дерева, он служит причиной быстрого созревания тканей и их одревеснения, что приводит к формированию узких годичных колец (Молчанов, 1976).

Для анализа реакции на засуху были взяты 1964, 1972, 2010 и 2014 годы. Результаты анализа приведены на рисунках 3.11-3.12. На ЛОД в засушливый год отмечался нормальный рост, а в следующие за ним два года – увеличение прироста на 20%. На Лиственничной аллее мы наблюдаем снижение роста в год засухи и увеличение роста на следующий за этим год.

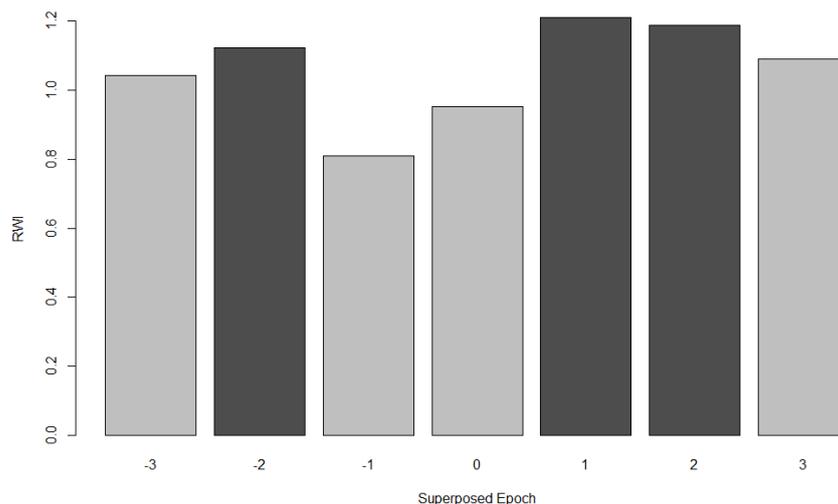


Рисунок 3.11 – Реакция деревьев ЛОД на засушливые годы

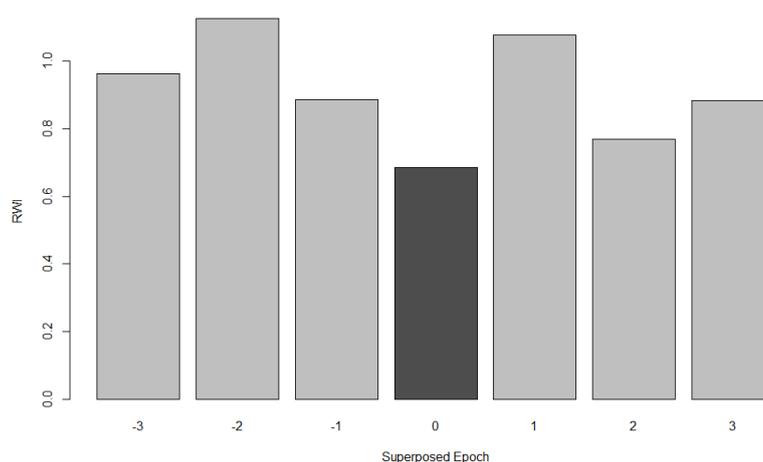


Рисунок 3.12 – Реакция деревьев Лиственничной аллеи на засушливые годы

Лучшая переносимость засухи на ЛОД может быть обусловлена тем, что леса сглаживают годовой ход температуры, понижая максимальные и повышая минимальные значения. Максимальные температуры в лесах на 4-6°C ниже, а минимальные на 3-4°C выше, чем на открытых участках. Менее интенсивное проникновение солнечной радиации под полог деревьев и более холодный воздух в лесах также является причиной более холодной температуры почвы – в

летний период она ниже, чем на открытых участках, причём на глубине 1 метра разница температур может достигать до 6 градусов (Чураков 2018).

Повышенное увлажнение. При переувлажнении нарушается тепловой режим и аэрация почвы, что угнетающе действует на растения. Избыточная влажность подавляет разложение органического вещества и нарушает всасывание питательных веществ.

Помимо этого, при длительном застое воды в почве начинают развиваться анаэробные процессы, такие как маслянокислое и другие виды брожения, из-за чего почве накапливаются диоксид углерода, органические кислоты, а также восстановленные соединения — органические и неорганические (соли, закиси железа и др.), многие из которых токсичны для корней растений (Климентова, 2006).

Для анализа реакции на переувлажнение были взяты 1973, 1991, 1998, 2004 годы.

Как видно из рисунков 3.13-3.14, на ЛОД в годы с повышенным увлажнением и следующие за ним два года наблюдался нормальный рост. На Лиственничной аллее наблюдалось незначительное снижение прироста в год с повышенным количеством осадков и увеличение в два следующих за ним года.

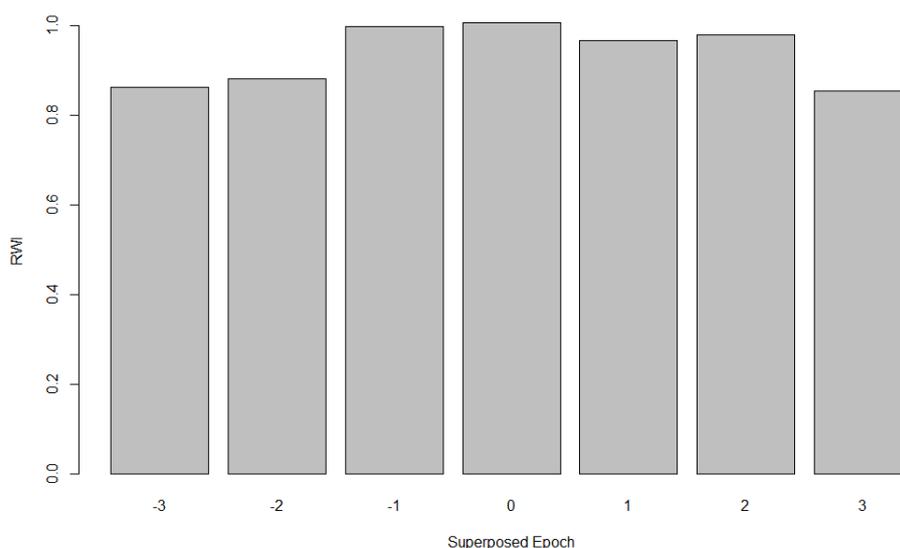


Рисунок 3.13 – Реакция деревьев ЛОД на переувлажнение

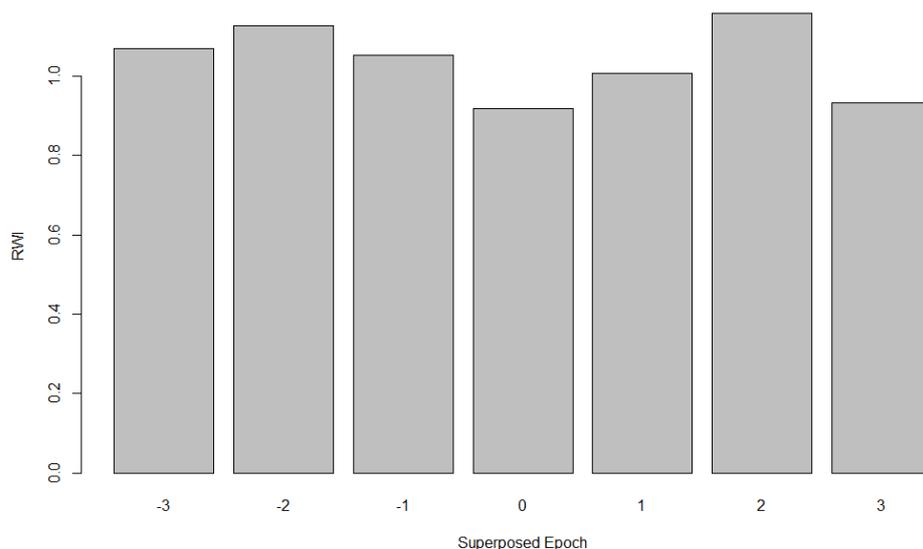


Рисунок 3.14 – Реакция деревьев Лиственничной аллеи на переувлажнение

Годы с аномально холодными зимами. Хотя лиственница является довольно холодостойким деревом, при воздействии продолжительных и сильных морозов могут возникать глубокие трещины в коре или древесине (морозобоины). Кроме непосредственного влияния низкой температуры на растения может происходить разрыв и механическое повреждение корней из-за уплотнения и растрескивания замёрзшей почвы. Ледяная корка на поверхности почвы ухудшает аэрацию и дыхание корней.

Для анализа реакции на аномально холодные зимы были взяты 1941, 2003, 2006, 2011 годы. Как видно из рисунка 3.15, в годы с аномально холодными зимами на ЛОД наблюдается рост несколько ниже нормы, значительное снижение происходит только на третий год. На Лиственничной аллее (рис.3.16) отмечается небольшое снижение роста в морозный год и значительное – на первый и третий годы после события.

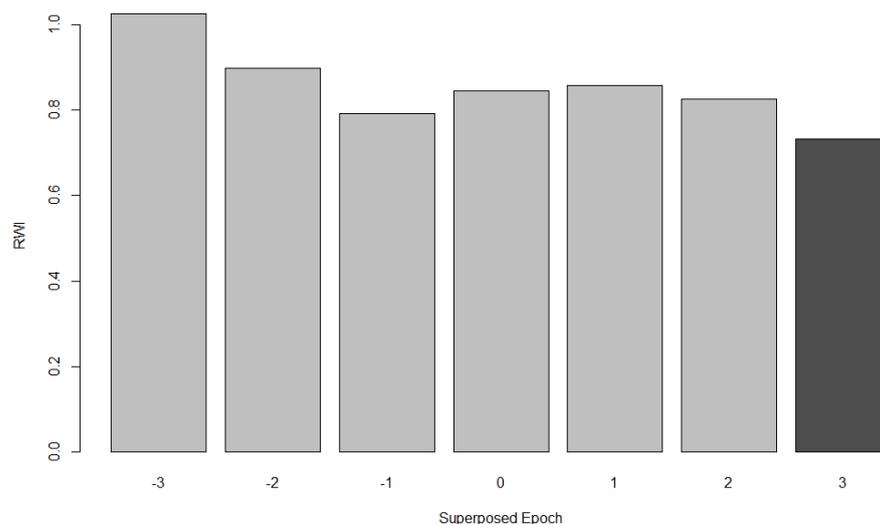


Рисунок 3.15 – Реакция деревьев ЛОД на аномально холодные зимы

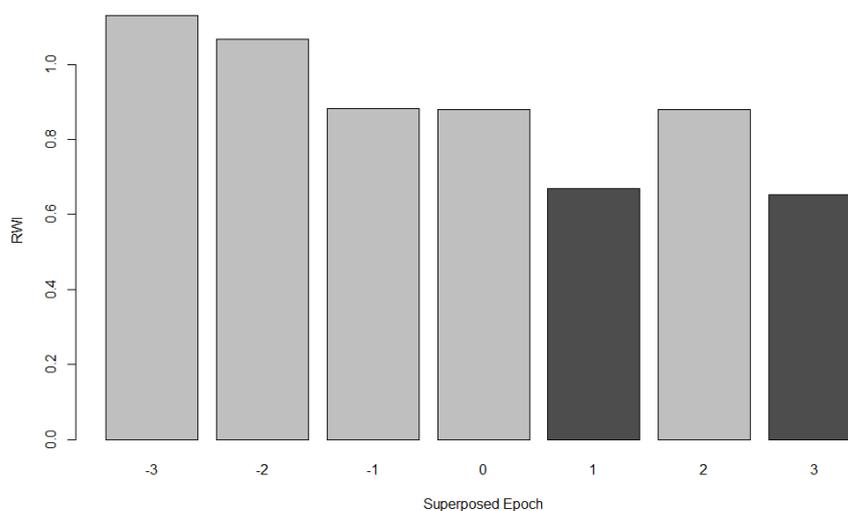


Рисунок 3.16 – Реакция деревьев Лиственничной аллеи на аномально холодные зимы

Большая морозоустойчивость деревьев на ЛОД может быть связана с тем, что благодаря большей влажности почвы, зимой температура почвы под лесом несколько выше, чем на открытых участках. Помимо этого, леса выравнивают ход температуры, препятствуя сильным понижениям температуры в зимнее время, поэтому опасность заморозков под пологом леса меньше, чем на открытой местности (Чураков, 2018).

Кроме того, на открытых пространствах, где снег сдувается, почва промерзает до больших глубин, чем на защищенных участках.

Устойчивость растений к отрицательным температурам определяется не только наследственными характеристиками данного вида, но и условиями, предшествующими наступлению морозов. В тканях растений к концу осени накапливаются запасные вещества, такие как сахара, обеспечивающие потребности растений в строительном материале и энергии. Кроме того, накопление сахаров уменьшает образование льда, защищая от замерзания большой объем внутриклеточной воды (Климентова, 2006)

Формирование морозоустойчивости начинается с сокращения фотопериода, служащего сигналом к накоплению ингибиторов в тканях и прекращению роста. Растения, которые растут при искусственно продлённом фотопериоде, не успевают завершить рост и становятся менее морозоустойчивыми (Климентова, 2006).

Зимние оттепели. Теплые зимы вызывают нарушение фазофаз растений, что может приводить к их истощению. Пробуждаясь от зимнего покоя раньше срока, растения постепенно расходуют запасы сахара и других питательных веществ. Такие растения весной легко повреждаются снежной плесенью, что также угнетает их (Климентова, 2006).

Для анализа реакции на зимние оттепели были взяты 1961 и 2008 годы. Зима 1960-1961 была аномально тёплой. Средняя температура декабря составила +0,1° С, а февраль 1961 года стал одним из самых тёплых за всю историю метеонаблюдений. Осадков в ту зиму тоже было гораздо меньше обычного. Высота снежного покрова составила всего 28 миллиметров против 47 миллиметров нормы. В 2008 году был установлен рекорд зимней температуры для Москвы и области - плюс 9,6 градуса. Кроме того, каждый зимний месяц 2008 года превышал показатели нормы на четыре-пять градусов.

На ЛОД отмечается увеличение роста в год с тёплой зимой и нормальный или чуть ниже нормы рост в последующие годы (рис.3.17). На Лиственничной

аллее в годы с тёплыми зимами наблюдается незначительное снижение роста в годы с тёплыми зимами и нормальный рост в следующие два года.

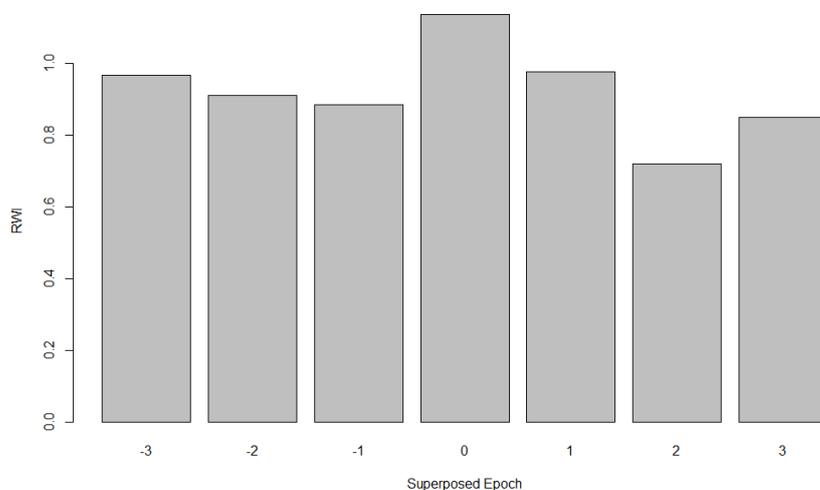


Рисунок 3.17– Реакция деревьев ЛОД на anomalно тёплые зимы

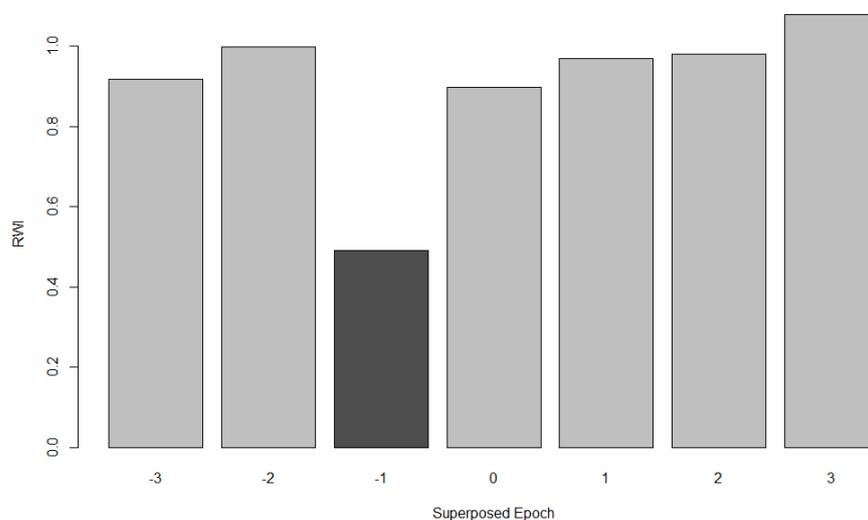


Рисунок 3.18 – Реакция деревьев Лиственничной аллеи на anomalно тёплые зимы

Более теплый микроклимат в черте города и дополнительное освещение продлевает время вегетации растений, зелёный конус листьев появляется раньше, а листопад начинается позднее, нарушаются физиолого-биохимические превращения в период покоя, что вызывает сокращение его глубины и сроков.

Изменение фенологических ритмов способствует ускорению процессов старения растений (Бухарина 2012).

3.4. Цикличность прироста

Наличие регулярных многолетних колебаний различной продолжительности является характерным для радиального прироста древесных растений, при этом в почти в каждом временном ряду содержится несколько циклов, отличающихся по длительности и способных налагаться друг на друга (Шиятов, 1986).

Для оценки цикличности был проведён спектральный анализ на основе вейвлет преобразования. Вейвлет отображает спектрально-временные характеристики временного ряда на частотно-временную плоскость (временной период). При преобразовании используется окно переменного размера, сужающееся при фокусировке на мелкомасштабных или высокочастотных характеристиках сигнала, и расширяющееся при фокусировке на крупномасштабных или низкочастотных функциях как зум-объектив (Kumar P, 1997).

Анализ цикличности климата

Результаты преобразования временных рядов по климатическим данным представлены на рисунках 3.19-3.20.

На всём протяжении климатических наблюдений за динамикой суммы активных температур преобладают четырёхлетние циклы, при чём сильнее всего они выражены в промежутке с 1905 по 1909, с 1970 по 1974 и с 1988 по 1992.

Из полученного по осадкам спектра мы можем видеть, что здесь также наблюдаются только 4-годовые циклы, однако эти межгодовые вариации непостоянны.

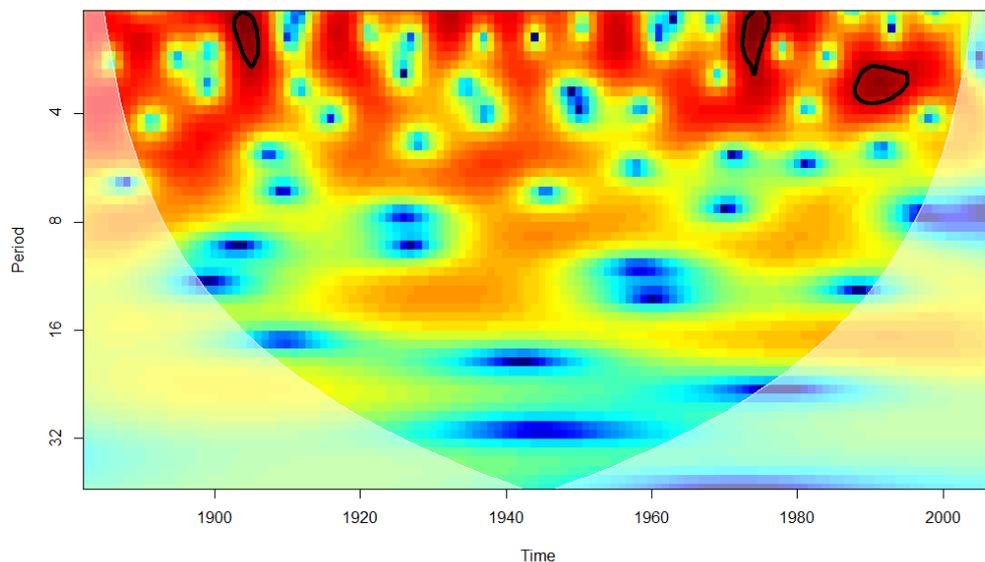


Рисунок 3.19 – Спектральный анализ на основе вейвлетов преобразования суммы активных температур

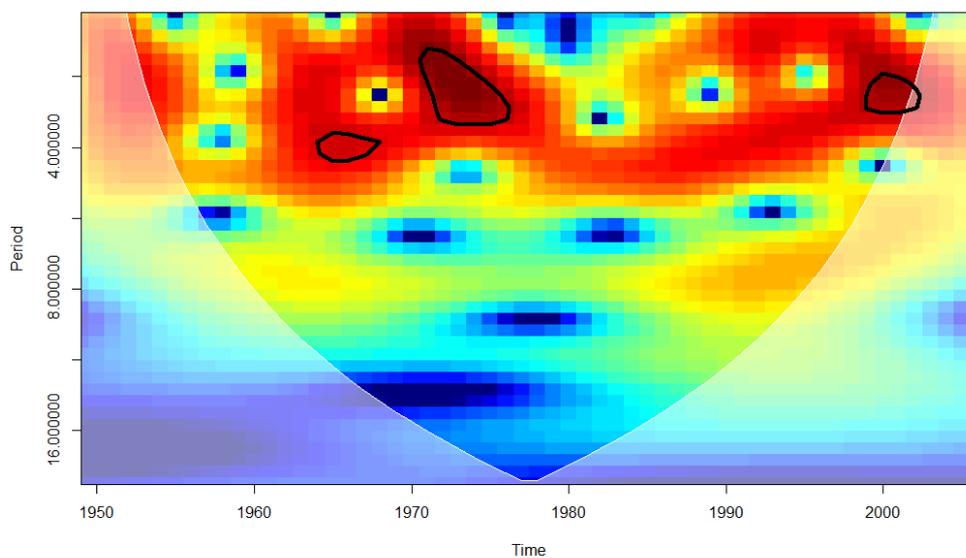


Рисунок 3.20– Спектральный анализ на основе вейвлетов преобразования суммы активных температур

Климат Земли испытывает колебания в широком диапазоне временных масштабов. Причины колебаний климата и трендов в климатических параметрах могут быть разными и не для всех периодичностей они установлены однозначно (Барляева, 2009).

Четырёхлетние циклы обнаруживают в колебаниях повторяемости форм атмосферной циркуляции (Дружинин и др., 1972), в гидрологических рядах (Масанова, 1976), в ходе осадков (Дроздов, Григорьева, 1971).

Анализ цикличности прироста

Результаты преобразования древесных хронологий представлены на рисунках 3.21-3.22. Заштрихованная область представляет собой конус влияния, где важны краевые эффекты. Чёрные контуры представляют собой частоты, значимые на 99% доверительном интервале.

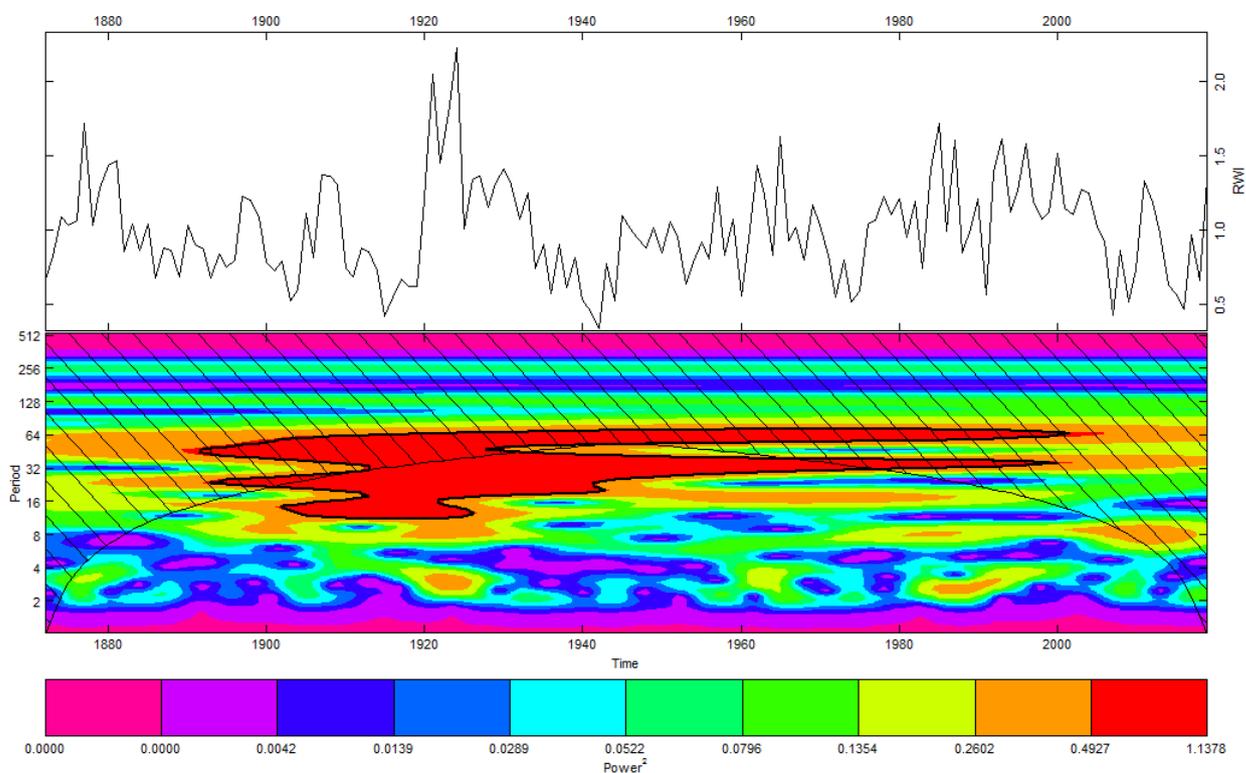


Рисунок 3.21 – Спектральный анализ на основе вейвлетов проиндексированных серий деревьев Лиственничной аллеи

Из полученного для Лиственничной аллеи спектра видно, что в промежутке с 1900 по 1920 год преобладает цикл приблизительно 12 лет. 16-летний цикл наблюдается во временном промежутке с 1910 по 1925 год. Также стоит отметить наличие 32-летнего цикла с 1910 по 1942 год. Судя по всему, все вышеперечисленные циклы являются частью 64-летнего цикла, значительно преобладающего с 1890 до 2000 года.

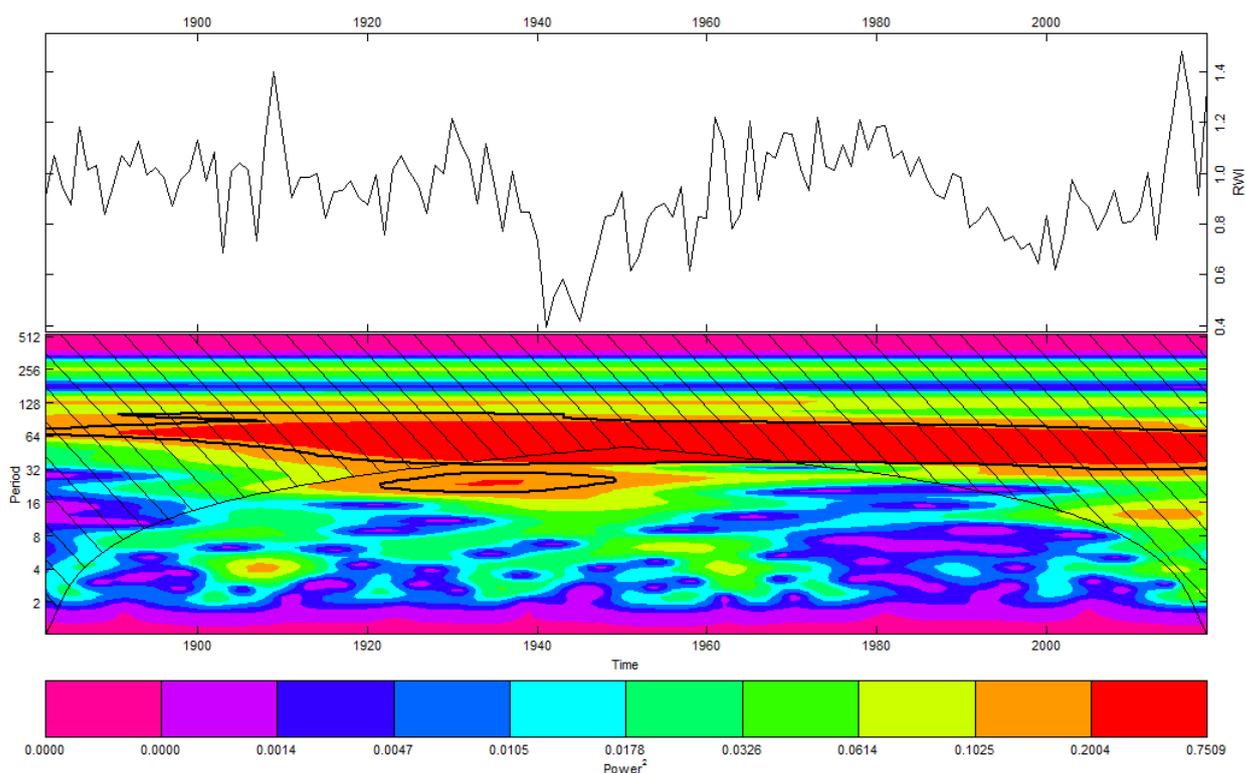


Рисунок 3.22 - Спектральный анализ на основе вейвлетов проиндексированных серий деревьев ЛОД

Характер пиков мощности, обнаруженных на спектре, полученном для деревьев ЛОД, несколько отличается. Здесь явно доминирует столетний цикл на промежутке с 1890 до 2020. Также наблюдается 64-летний цикл с 1910 до 2020. 32-летний цикл на промежутке с 1910 по 1942 год выражен очень слабо, 16-летний почти не проявлен.

Сопоставление хода этих циклов у двух рядов по лиственнице показывает наличие и сходных черт, и различий. В обоих типах местообитаний выражен цикл продолжительностью 64 года, однако у рядов наблюдается сдвиг фаз этого цикла: в лесном биоценозе он его доминирование более длительное. Кроме того, для дендрохронологического ряда, построенного для Лесной опытной дачи характерна трансформация 64-летнего цикла в цикл 80-90 лет

Как уже отмечалось 32-летний цикл на ЛОД выражен очень слабо, а 16-летние и 12-летние отсутствуют.

Существует несколько точек зрения относительно причин возникновения 80-90-летнего цикла. Наиболее распространённой точкой зрения является его обусловленность солнечной активностью (Шнитников, 1968, Максимов, 1970; Полозова, 1973; Гедеонов, 1973; Гире, 1971). Многие исследователи считают, что причиной его появления следует считать изменение прозрачности атмосферы за счет вулканической пыли (Будыко, 1971; Давитая, 1971). О.А. Дроздов (1977) придерживается этой же точки зрения, но считает, что прозрачность атмосферы обусловлена солнечной активностью. Ряд авторов связывают проявление 80-90-летнего цикла с увеличением содержания углекислого газа в атмосфере.

Цикл 64 года, несмотря на то, что он часто выявляется в колебаниях прироста (Douglass, 1936; Максимов, 1952, Шиятов, 1986), пока слабо изучен. Его часто рассматривают как промежуточный между 80-90 летним и 33-летним.

Брикнеровский цикл продолжительностью 32-34 года в дендрохронологических рядах встречается очень редко. Некоторые авторы считают, что он обусловлен солнечной активностью (Douglass, 1919, 1936; Максимов, 1970). А.В. Шнитков (1957, 1968) объясняет возникновение брикнеровского цикла сочетанием температуры атмосферного воздуха и осадков.

Шестнадцати- и двенадцатилетние циклы считаются солнечно обусловленными.

Если сопоставить данные по приросту деревьев, сумме активных температур и сумме осадков, то мы увидим, что климатические циклы не совпадают с циклами роста деревьев, поэтому причина цикличности радиального прироста вызвана не флуктуациями климата, а определяется действием иных факторов, к числу которых относятся техногенная деятельность человека. Различия в характере цикличности прироста наблюдаются с 1920-х годов, что может быть вызвано начавшимся активным строительством жилых домов.

Выводы

1. Деревья, выросшие на Лиственничной аллее, имеют более чётко выраженный возрастной тренд: с увеличением возраста происходит снижение радиального прироста. Коэффициент корреляции между возрастом и среднегодовым приростом в ЛОД -0,35 (при $p = 0.08$), на Лиственничной аллее – 0,94 (при $p < 2 \cdot 2^{-16}$). Менее интенсивный прирост деревьев ЛОД на начальном этапе онтогенеза обусловлен более сильной конкуренцией за свет в лесном фитоценозе, а более выраженное синильное снижение прироста на ЛА вызвано длительным рекреационным воздействием на древесные насаждения, приводящим к ослаблению деревьев, и, как следствие, снижению прироста.

2. Наибольшей чувствительностью (коэффициент чувствительности – 0,49) обладают перестойные деревья на Лиственничной аллее, наименьшей – средневозрастные деревья на ЛОД (0,29). Наибольшие значения коэффициента синхронности (78%) имеют перестойные деревья ЛОД, наименьшей – средневозрастные деревья на ЛОД.

3. Корреляционный анализ показывает, что лимитирующими факторами на обоих участках может служить увеличение суммы активных температур выше оптимальной и избыточное увлажнение, однако деревья на Лиственничной аллее чувствительны к переувлажнению в большей степени.

4. Анализ наложенных эпох показал, что деревья в городских условиях хуже переносят экстремальные погодные явления, что связано с тем, что леса сглаживают годовой ход температуры, понижая максимальные и повышая минимальные значения.

5. Климатические циклы не совпадают с циклами роста деревьев, что свидетельствует о том, что причиной цикличности радиального прироста являются не флуктуации климата, а действие иных факторов, к числу которых относится техногенная деятельность человека. Различия в характере

цикличности прироста наблюдаются с 1920-х годов, что может быть вызвано начавшимся активным строительством жилых домов.

Литература

1. Абаимов В.Ф. Дендрология : учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / В.Ф.Абаимов. — 3-е изд., перераб. — М.: Издательский центр «Академия», 2009. — 368 с.
2. Авдеева Елена Владимировна, Кузьмичев Валерий Васильевич Специфика онтогенеза и индикаторная роль лиственницы сибирской (*Larix sibirica* Ledeb.) в условиях городской среды // ХБЗ. 2007. №4-5. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/spetsifika-ontogeneza-i-indikatornaya-rol-listvennitsy-sibirskoy-larix-sibirica-ledeb-v-usloviyah-gorodskoy-sredy> (дата обращения: 18.05.2021).
3. Астафьева Н.М. (1996) Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения // Успехи физ. наук. 1996. Т. 166. № 11. С. 1145–1170.
4. Барляева Т.В., Миронова И.А., Понявин Д.И. О природе декадной вариации в климатических данных второй половины XX века // ДАН. –2009. – Т. 425, № 3. – С. 395–399.
5. Березина Н.А. Экология растений: учеб. пособие для студ. высш. учебн. зав./ Н.А. Берёзина, Н.Б. Афанасьева. – М: Издательский центр «Академия», 2009, 400 с
6. Бигон М. Экология. Особи, популяции, сообщества: В 2 т./ М. Бигон, Дж. Харпер, К. Таундсен – М: Мир, 1989 – Т.1. – 667 с., Т.2. – 477 с.
7. Будаичиев Курс лекций дендрология, . –Москва: Наука, 2006
8. Будыко М.И. Климат и жизнь. Л.: Гидрометеиздат, 1971.470 с.
9. Бухарина И. Л., Журавлева А.Н., Большова О.Г. Городские насаждения: экологический аспект: монография / И.Л. Бухарина, А.Н. Журавлева, О.Г. Большова – Ижевск: Изд-во «Удмуртский университет», 2012. – 206с.
10. Ваганов Е.А. Анализ роста дерева по структуре годовых колец [Текст] / Е.А. Ваганов, И.А. Терсков. – Новосибирск: Наука Сиб.отд., 1977. – 95 с.
11. Ваганов Е. А., Шашкин А. В. Рост и структура годовых колец хвойных. – Новосибирск: Наука, 2000. – 214 с.

12. Вольф И.В. , Синякова М. А. Химия окружающей среды. Химия гидросферы: учебное пособие; СПбГТУРП.- СПб., 2013. - 90 с.
13. Геденов АД. Изменения температуры воздуха на северном полушарии за 90 лет. Л.: Гидрометеиздат, 1973. - 145 с.
14. Гире А.А. Многолетние колебания атмосферной циркуляции и долгосрочные гидрометеорологические прогнозы. Л.: Гидрометеиздат, 1971. 277 с.
15. Давитая Ф.Ф. История атмосферы и динамика ее газового состава. – Метеорология и гидрология, 1971, N2 2, с. 21-28.
16. Дальке И.В., Головки Т.К. Оптимальная температура и освещенность для фотосинтеза толстянковых на Севере (на примере *Rhodiolo Rosea* L.) // Вестн. Башк. ун-та. 2001. № 2 (1). С. 29–31
17. Даценко Н.М., Монин А.С., Сонечкин Д.М. О колебаниях глобального климата за последние 150 лет // ДАН. – 2004. – Т. 399, № 2. – С. 253–256.
18. Дроздов О.А., Григорьева А.С. Многолетние циклические колебания атмосферных осадков на территории СССР. Л.: Гидрометеиздат, 1971. 157 с.
19. Дроздов О.А. Возможен ли научный прогноз температуры и осадков на несколько лет вперед.- В кн.: Климатология сверхдолгосрочный прогноз. Л.: Гидрометеиздат, 1977, с. 3-9.
20. Дроздов О.А., Васильев В.А., Кобышева Н.В., Раевский А.Н., Смекалова Л.К., Школьный Е.П. «Климатология» - Ленинград: изд-во «Гидрометеиздат», 1989 – 568с.
21. Дроздов О.А., Арапов П.П., Лугина К.М. и др. Естественные и антропогенные изменения климата // Глобальные и региональные изменения климата и их природные и социально-экономические последствия. –М.: Геос, 2000. – С. 54–59.
22. Дроздов С.Н., Курец В.К., Попов Э.Г. и др. Влияние температуры на CO₂-газообмен растений // Вестн. Башк. ун-та. 2001. № 2 (1). С. 33–34.

23. Дендрохронология/ Д.В. Тишин, Н.А. Чижикова. – Казань: Казанский университет, 2018. – 34 с
24. Дружинин И.П., Коноваленка З.П., Агарков С.Г. Цикличность многолетних колебаний атмосферной циркуляции. - В кн.: Проблемы экспертизы растительных объектов. М.: ВНИИ судебных экспертиз, 1972, с. 21-28
25. Загирова С.В. Структура ассимиляционного аппарата и CO₂-газообмен у хвойных. Екатеринбург: УрО РАН, 1999. 108 с
26. Карбасникова Е.Б., Бабич Н.А., Карбасников А.А. Особенности сезонного развития лиственницы (*Larix Mill.*) в условиях южной подзоны тайги / Лесной вестник / *Forestry Bulletin*, 2020. Т. 24. № 3. С. 53–59. © МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2020
27. Кауричев, И. С. Окислительно-восстановительные процессы и их роль в генезисе и плодородии почв [Текст] : монография / И. С. Кауричев, Д. С. Орлов ; Акад. сельскохоз. наук им. В. И. Ленина. - М. : Колос, 1982. - 247 с.
28. Кислов А.В., Варенцов М.И., Горлач И.А., Алексеева Л.И. «Остров тепла» московской агломерации и урбанистическое усиление глобального потепления // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2017. №4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ostrov-tepla-moskovskoy-aglomeratsii-i-urbanisticheskoe-usilenie-globalnogo-potepleniya> (дата обращения: 23.11.2020).
29. Кондратьев К.Я. Глобальные изменения климата: данные наблюдений и результаты численного моделирования // Исслед. Земли из космоса. 2004. № 2. С. 61–96.
30. Кузнецов В.В. Физиология растений/В.В. Кузнецов, Г.А. Дмитриева. – М: Высшая школа, 2005, 736 с
31. Кузнецова Е.П. Дендроиндикация функционирования геосистем Терехольской котловины Тывы, Москва, 2014
32. Курец В.К., Марковская Е.Ф., Попов Э.Г. и др. Моделирование газообмена дикорастущих растений // Эколого-физиологические исследования фотосинтеза и водного режима растений в полевых условиях. Иркутск, 1983. С. 154–159.

33. Лархер В. Экология растений. – М: Мир, 1978, 384 с
34. Лиёпа И.Я. Динамика древесных запасов: прогнозирование и экология. Рига: Зинатне, 1980. – 170 с.
35. Лир Х., Польштер Г., Фидлер Г. И. Физиология древесных растений / Пер. с нем. М.: Лесн. пром-сть, 1974. 424 с.
36. Максимов И.В. О восьмидесятилетнем цикле колебаний климата Земли. - Докл. АН СССР, 1952, т. 86, NR 5, с. 917- 920.
37. Максимов И.В. Геофизические силы и воды океана. Л.: Гидрометеоздат, 1970.446 с.
38. Масанова М.Д. Нестационарность ритмических составляющих гидрологических рядов.- В кн.: Ритмика природных явлений. Л.: Геогр. о-во СССР~. 1976, с. 19-20.
39. Матвеев, С.М. Динамика состояния сосновых насаждений под воздействием рекреации [Текст] / С.М. Матвеев // Вестник ВГУ: Серия география и геоэкология. – 2005. – № 2. – С. 97-103
40. Мартынов А.Н., Мельников Е.С., Ковязин В.Ф., Аникин А.С., Минаев В.Н., Беляева Н.В. Основы лесного хозяйства и таксация леса: Учебное пособие для студентов направления 250300 «Технология и оборудование лесозаготовительного и деревообрабатывающего производств» и специальности 120303 «Городской кадастр». – СПб.: ООО Изд-во «Лань», 2008. – 372 с.
41. Методы экологического мониторинга : Большой специальный практикум / [Э. Ф. Емлин и др.] ; под общ. ред. Т. А. Радченко ; М-во науки и высш. образования Рос. Федерации, Урал. федер. ун-т. — 2-е изд., испр. и доп. — Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2019. — 324 с.
42. Молчанов А.А. Дендроклиматические основы прогнозов погоды [Текст]/ А.А. Молчанов. – М: Наука, 1976. – 176 с
43. Молчанов А.Г. Экофизиологическое изучение продуктивности древостоев. М.: Наука, 1983. 136 с.

44. Молчанов А.Г. Баланс CO₂ в экосистемах сосняков и дубрав в разных лесорастительных зонах. Тула: Гриф и К, 2007. 284 с.
45. Монин А.С., Сонечкин Д.М. (2005) Колебания климата по данным наблюдений: тройной солнечный и другие циклы. М.: Наука, 2005. 191 с.
46. Мухин В.А., Воронин П.Ю. Компоненты CO₂-газообмена таежного древостоя в широтной трансекте Западной Сибири // Материалы докл. Междунар. конф.: В 3 ч. Ч. 3. Современная физиология растений: от молекул до экосистем. Сыктывкар, 2007. С. 67–68
47. Наумов, В.Д. 145 лет ЛОД (Лесной опытной даче Тимирязевской сельскохозяйственной академии) [Электронный ресурс] / В.Д. Наумов .— : [Б.и.] .— 802 с. — Режим доступа: <https://rucont.ru/efd/13165>
48. Николаевский В. С., Васина И. В., Николаевская Н. Г. Влияние некоторых факторов городской среды на состояние древесных пород // Вестник МГУЛ – Лесной вестник. 1998. №2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-nekotoryh-faktorov-gorodskoy-sredy-na-sostoyanie-drevesnyh-porod> (дата обращения: 21.09.2020).
49. Николаев А.Н., Федоров А.Н., Угаров И.С., Торговкин Я.И., Ефремов П.В., Аргунов Р.Н (2011) Влияние характера мерзлотных ландшафтов на рост лиственничных древостоев в Центральной Якутии. Вестник Северо-Восточного Федерального Университета им. М.К. Аммосова. Якутск, Изд-во СВФУ, 1, с. 25-35.
50. Неверова О.А. Поглощительная способность древесных растений как средство оптимизации среды промышленного города // Экология промышленного производства. – 2002. – № 1. – С. 2-8.
51. Неверова О.А., Колмогорова Е.Ю. Древесные растения и урбанизированная среда: экологические и биотехнологические аспекты. – Новосибирск: Наука, 2003. – 222 с.
52. Орт Д., Меландри Б.А., Юнге В. Фотосинтез: В 2 т. Пер. с англ. / Под ред. Говинджи. М.: Мир, 1987. Т. 2. 460 с.

53. Переведенцев Ю.П. П 27 Теория климата: учебное пособие. – 2-е изд. перераб. и доп. – Казань: Казан. гос. ун-т, 2009. – 504 с.
54. Полозова ЛГ. Аномалии средней месячной температуры воздуха над северным полушарием в различные фазы 11-летнего и векового циклов солнечной активности. - Труды/Гл. геофиз. обсерватория им. А.И. Воейкова, 1973, вып. 299, с. 47-51.
55. Работнов Т.А. Актуальные вопросы экологии растений// Итоги науки и техники. Ботаника, Т.3- М: Изд-во ВИНТИ, 1979, 70 с
56. Санников С. Н., Санникова Н. С., Петрова И. В. Очерки по теории лесной популяционной биологии. Екатеринбург: УрО РАН, 2012. 273 с.
57. Сидоренков Н.С. Атмосферные процессы и вращение Земли. СПб.: Гидрометеиздат, 2002. 200 с.
58. Соловьева Е.С., Ашихмина Т.Я., Широких И.Г. Оценка химического загрязнения урбаноэмов // Экологические проблемы промышленных городов: Сб. науч. трудов. – Саратов, 2011. – С. 136-139.
59. Соломина О.Н., Долгова Е.А., Максимова О.Е. С 60 Реконструкция гидрометеорологических условий последних столетий на Северном Кавказе, в Крыму и на Тянь-Шане по дендрохронологическим данным. — М. ; СПб. : Нестор-История, 2012. — 232 с., ил.
60. Смагин А.В., Азовцева Н.А., Смагина М.В. и др. Некоторые критерии и методы оценки экологического состояния почв в связи с озеленением городских территорий / А.В.Смагин, Н. А. Азовцева, М.В. Смагина, А.Л. Степанов, А.Д. Мягкова, А.С. Курбатова //Почвоведение. – 2006. – №5. – С. 603-615.
61. Суворова, Г.Г. Фотосинтетическая продуктивность хвойных древостоев Иркутской области [Электронный ресурс] / Г.Г. Суворова, Е.В. Попова ; отв. ред. Р.К. Саляев ; Рос. акад. наук, Сиб. отд-ние, Сиб. ин-т физиол. и биохим. растений. – Новосибирск : Академическое изд-во “Гео”, 2015. – 95 с. Режим доступа: www.siGibr.irk.ru. – ISBN 978-5-906284-87-7

62. Сукачев В.Н. О внутривидовых и межвидовых взаимоотношениях среди растений // Бот. журн., 1953, – т. 38, – № 1. – С. 57–96.
63. Тимерьянов А.Ш. Лесомелиоративные насаждения республики Башкортостан в условиях глобального изменения климата [Текст] /А.Ш Тимерьянов // Лесные экосистемы в условиях изменения климата: биологическая продуктивность, мониторинг и адаптационные технологии: материалы международной конференции с элементами научной школы для молодёжи [Электронный ресурс]. Йошкар-Ола: Марий-ский государственный технический университет, 2010. 275 с.
64. Тимашук, Д.А. Изменчивость радиального прироста сосны как индикатор степени рекреационного воздействия [Текст] / Д.А. Тимашук // Лесные экосистемы в условиях меняющегося климата: проблемы и перспективы: материалы международной научно-технической юбилейной конференции 21-22 мая 2015 г, ФГБОУ ВО «ВГЛТУ». – Воронеж, 2015. – С. 238-242.
65. Тишин Д. В. Дендроэкология (методика древесно-кольцевого анализа) /Д. В. Тишин. — Казань : Казан. ун-т, 2011. — 33 с.
66. Тихонова И. О. Экологический мониторинг атмосферы : учеб. пособие / И. О. Тихонова, В. В. Тарасов, Н. Е. Кручинина. — М. : Форум, НИЦ ИНФРА-М, 2013. — 136 с.
67. Усольцев В. А., Воробейчик Е. Л., Бергман И. Е. Биологическая продуктивность лесов Урала в условиях техногенного загрязнения: исследование системы связей и закономерностей. Екатеринбург: УГЛТУ, 2012. 365 с.
68. Филиппова А.К., Осколков В.А., Янькова Л.С. и др. Влияние факторов среды на фотосинтез и содержание пигментов в условиях засухи и оптимального увлажнения у лиственницы сибирской // Материалы Всерос. конф. “Природная и антропогенная динамика наземных экосистем”. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2005. С. 63–66.

69. Хромов С.П. Метеорология и климатология: учебник. – 7-е изд./ С.П. Хромов, М.А. Петросянц. – М. : Изд-во Моск. ун-та: Наука, 2006 – 582 с. : илл – (Классический университетский учебник)
70. Чураков Б.П. Ч- Лесоведение: учебник /Б.П.Чураков, Д.Б.Чураков. – Ульяновск: УлГУ, 2018. – 259 с.
71. Шиятов С.Г., Ваганов Е.А., Кирдянов А.В., Круглов В.Б., Мазепа В.С., Наурзбаев М.М., Хантемиров Р .М. М 545 Методы дендрохронологии. Часть 1. Основы дендрохронологии. Сбор и получение древесно-кольцевой информации: Учебнометодич. пособие. Красноярск: КрасГУ, 2000. 80 с.
72. Шиятов С. Г. Дендрохронология верхней границы леса на Урале. - М.: Наука, 1986.
73. Шутов, И. В. (заслуж. лесовод Российской Федерации, чл. -кор. РАСХН, д-р с. -х. наук). Лесная политика в условиях изменяющегося климата [Текст] / И. В. Шутов, Б. Н. Рябинин // Лесное хозяйство. - 2009. - N 2. - С. 4-9 . - ISSN 0235-7089
74. Шнитников А.В. Внутривековая изменчивость компонентов общей увлажненности. Л.: Наука,1969. 244 с.
75. Янькова Л.С., Копытова Л.Д., Филиппова А.К. и др. Сезонная изменчивость фотосинтетической активности и зеленых пигментов у ели сибирской // Материалы Всерос. конф. “Природная и антропогенная динамика наземных экосистем”. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2005. С. 55–58.
76. Яшин И.М., Васенев И.И., Атенбеков Р.А. Путеводитель почвенно-экологической экскурсии по Лесной опытной даче РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева Международной экологической школы. Москва. 2016. - 55 с.
77. Asok K. Sen and Zoltán Kern. Wavelet analysis of low-frequency variability in oak tree-ring chronologies from east Central Europe
78. Alberte R.S., Thornber J.P., Fiscus E.L. Water stress effects on the content and organization of chlorophyll in mesophyll and bundle sheath chloroplasts of maize // Plant Physiol. 1977. V. 59. P. 351–353.

79. Briffa K. R., Jones P. D., Schweingruber F. H., Karlén W., Shiyatov S. G.. Tree-ring variables as proxy-climate indicators: Problems with low-frequency signals // In: *Climate Change and Forcing Mechanisms of the Last 2000 Years* (ed. P. D. Jones, R. S. Bradley & J. Jouzel), NATO ASI Series. – Berlin:Springer-Verlag, 1996. – Vol. 141. – P. 9–41.
80. Bunn, A.G. A Dendrochronology Program Library in R (dplR). *Dendrochronologia*, 2008. – 26. – P. 115–124
81. *Climate Change 2007 Mitigation: Contribution of WG 3 to the IV Assessment Report of the IPCC* / Eds: B. Metz et al. – Cambridge: Cambridge University Press, 2007. – 851 p.
82. Cook E. R. A Time Series Analysis Approach to Tree-Ring Standardization: Ph. D. Dissertation. – Tucson, AZ: University of Arizona, 1985. – 171 p.
83. Cook, E.R.; Briffa, K.R.; Shiyatov, S.; Mazepa, V.; Jones, P.D. Data analysis. In *Methods of Dendrochronology: Applications in the Environmental Sciences*; Cook, E.R., Kairiuksti, L.A., Eds.; Kluwer Academic Publishers: Dordrecht, The Netherlands, 1990; pp. 97–162.
84. Douglass A. E. Climatic cycles and tree-growth. A study of the annual rings of trees in relation to climate and solar activity. – Washington: Carnegie Inst., 1919. – Vol. 1. – 127 p
85. Douglass A.E. Climatic cycles and tree growth: A study of cycles. Wash.CarnegieInst.,1936. Vol. 3.171 p.
86. Douglas, E., Vogel, R., Kroll, C., 2000. Trends in floods and low flows in the United States: impact of spatial correlation. *J. Hydrol.* 240 (1), 90–105.
87. Ferguson C. W. A 7104-year annual tree-ring chronology for bristlecone pine, *Pinus aristata*, from the White Mountains, California. - *Tree-Ring Bull.*, 1969, vol. 29, N 3/4, p. 3-29.
88. Fritts H. C. *Tree rings and climate*. Acad. Press: London - New York - San Francisco, 1976, 576 pp.

89. Frohlich C., Lean J. (1998) The Sun's total irradiance: Cycles and trends in the past two decades and associated climate change uncertainties // *Geophysical Research Letters*. 1998. V. 25. P. 4377–4380.
90. Evstigneev O.I., Korotkov V.N. Ontogenetic stages of trees: an overview // *Russian Journal of Ecosystem Ecology*. - 2016. - Vol. 1 (2). - P. 1-31. - DOI: 10.21685/2500-0578-2016-2-
91. Geyer B. Stadtokologie als junge Wissenschaftsdisziplin // *Stadtokologie und Kleingarten – verbesserte Chancen für die Umwelt*. – 2002. – S. 7-26.
92. Jacoby G.C., Lovelius N.V., Shumilov O.I., Raspopov O.M., Karbainov J.M., Frank D.C. (1978) Long-term temperature trends and tree growth in the Taymir region of northern Siberia // *Quaternary Research*. 1978. V. 53(3). P. 312–318.
93. Kumar P, Foufoula-Georgiou E., Wavelet analysis for geophysical applications. *Rev. Geophys.*, 1997, 35, 385–412
94. Kasperidus H. D. Städte, Urbanisierung und Struktur der Stadt aus ökologischer Sicht // *Stadtokologie und Kleingarten – verbesserte Chancen für die Umwelt*. – 2002. – S. 27-49.
95. Laski, L., & Schellekens, S. (2007). Growing up urban. In the state of world population 2007 youth supplement. United Nations Population Fund (UNFPA).
96. Lough, J. M. and Fritts, H. C. (1987) An assessment of the possible effects of volcanic eruptions on
97. Mizanur Rahman, Mahmuda Islam, Jakob Wernicke and Achim Bräuning .Changes in Sensitivity of Tree-Ring Widths to Climate in a Tropical Moist Forest Tree in Bangladesh
98. Mohanty P., Boyer J.S. Chloroplast response to low leaf water potentials. IV. Quantum yield is reduced // *Plant Physiol*. 1976. V. 57. P. 704–709.
99. Orvis K.H., Grissino-Mayer H.D. Standardizing the reporting of abrasive papers used to surface tree-ring samples // *Tree-Ring Research*. 2002. V. 58. P. 47–50.

100. Petit J., Jouzel J., Raynaud D. et al. Climate and atmospheric history of the past 420.000 years from the Vostok Ice Core, Antarctica // *Nature*. 1999. V. 404. P. 429–436.
101. Pons, Thijs & Welschen, Rob. (2003). Midday depression of net photosynthesis in the tropical rainforest tree *Eperua grandiflora*: Contributions of stomatal and internal conductances, respiration and Rubisco functioning. *Tree physiology*. 23. 937-47. [10.1093/treephys/23.14.937](https://doi.org/10.1093/treephys/23.14.937)
102. Shi, J., Xiang, W., Liu, Q., & Shah, S. (2019). MtreeRing: An R package with graphical user interface for automatic measurement of tree ring widths using image processing techniques. *Dendrochronologia*, 58, . doi: [10.1016/j.dendro.2019.125644](https://doi.org/10.1016/j.dendro.2019.125644)
103. Schweingruber, F. H., Eckstein D., Serre-Bachet F. and Bräker O. U. Identification, presentation and interpretation of event years and pointer years in Dendrochronology // *Dendrochronologia*. – 1990. – Vol. 8. – P. 9–39
104. Svante Arrhenius «On the Influence of Carbonic Acid in the Air Upon the Temperature of the Ground», *Philosophical Magazine and Journal Science, Series 5*, Volume 41, pages 237—276
105. Urban microclimate analysis with consideration of local ambienttemperature, external heat gain, urban ventilation, and outdoorthermal comfort in the tropics Marcel Ignatiusa,*, Nyuk Hien Wonga, Steve Kardinal Jusuf. *Sustainable Cities and Society*, 2015
106. Urban, J., Rubtsov, A. V, Urban, A. V, Shashkin, A. V, & Benkova, V. E. (2019). Canopy transpiration of a *Larix sibirica* and *Pinus sylvestris* forest in Central Siberia. *Agricultural and forest meteorology*, 271, 64-72.
107. Usoltsev V. A. Foliage efficiency of forest-forming species in the climatic gradients of Eurasia // *Sibirskij Lesnoj Zurnal (Siberian Journal of Forest Science)*. 2017. N. 4: 52–65 (in Russian with English abstract).
108. Vaganov E.A., Hughes M.K., Shashkin A.V. (2006) Growth dynamics of conifer tree rings. *Images of past and future environment*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, p. 1–71.

109. Wigley, T.M.L.; Briffa, K.R.; Jones, P.D. On the average value of correlated time series, with applications in dendroclimatology and hydrometeorology. *J. Clim. Appl. Meteorol.* 1984, 23, 201–213.