

Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.4/20>

УДК 630*181



Дендроклиматология сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в условиях Усманского бора Воронежской области

Сергей М. Матвеев ✉, lisovod@bk.ru,  <https://orcid.org/0000-0001-8532-1484>

Дарья А. Литовченко, timashchuk90@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0003-2973-7447>

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация

Изучена динамика радиального прироста 150-летнего древостоя сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) Усманского бора Воронежской области (островной бор лесостепи Русской равнины), как индикатора изменчивости климатических условий и основы продуктивности древостоя. Выявлены циклические составляющие колебаний прироста общей, ранней и поздней древесины сосны обыкновенной за более чем вековой период, в связи с воздействием лимитирующих рост факторов климата. В динамике колебаний общей ширины годичных колец и ранней древесины сосны обыкновенной, а также лимитирующего прирост фактора, атмосферных осадков, превалирует цикл Брикнера, длительностью 32, 40-41 год. Также хорошо проявляются 11 и 24-летние циклы. В динамике колебаний поздней древесины наиболее выражена 10-11-летняя цикличность. В колебаниях солнечной активности ведущей является 10-11-летняя циклическая составляющая. В колебаниях гидротермического коэффициента превалирует высокочастотная составляющая (2-4 года), также присутствует низкочастотная цикличность (73, 50, 38 лет и др.). Установлены корреляционные связи и сила влияния ключевых лимитирующих факторов для Центральной лесостепи: количества осадков и температур воздуха. Выявлена значимость для формирования ранней древесины осадков марта, поздней древесины – осадков апреля. За май-август чётко выражена положительная корреляционная связь с осадками (до 0,42 в мае для ранней древесины) и отрицательная связь с температурой (до -0,3 для ранней древесины также в мае). Коэффициент корреляции с ГТК значительно выше, чем с осадками и температурой по отдельности для всех видов древесины. Связь положительная, значительная (0,52-0,55). Сила влияния на формирование ширины годичных колец также максимальна для ГТК (до 81 % для поздней древесины). Проведена предварительная оценка депонирования углерода спелыми сосновыми насаждениями. Выявлено, что одно среднее дерево 150-летнего древостоя в среднем за последние 10 лет (2013-2022 гг.) депонировало 12,8 г. углерода.

Ключевые слова: сосна обыкновенная, *Pinus sylvestris* L., дендроклиматология, лимитирующие факторы, корреляционные связи, депонирование углерода

Финансирование: исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 21-14-00233 «От клеток к деревьям: биомеханика древесины через мультимасштабные физикомеханические и термографические исследования субклеточной, клеточной и надклеточной структур годовых колец роста».

В рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 1023013000012-7 «Биогеохимический мониторинг цикла углерода в природных и антропогенных экосистемах Воронежской области в условиях глобального изменения климата (FZUR-2023-0001)».

Благодарности: авторы благодарят рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Матвеев С. М. Дендроклиматология сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в условиях Усманского бора Воронежской области / С. М. Матвеев, Д. А. Литовченко // Лесотехнический журнал. – 2023. – Т. 13. – № 4 (52). – Ч. 2. – С. 110–136. – Библиогр.: с. 130–136 (41 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.4/20>.

Поступила 27.10.2023 *Пересмотрена* 04.12.2023 *Принята* 11.12.2023 *Опубликована онлайн* 16.01.2024

Article

Dendroclimatology of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in the Usmansky pine forest conditions of Voronezh region

Sergey M. Matveev ✉, lisovod@bk.ru,  <https://orcid.org/0000-0001-8532-1484>

Daria A. Litovchenko, timashchuk90@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0003-2973-7447>

Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh city, 394087, Russian Federation

Abstract

The dynamics of the radial increment of a 150-year-old Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) tree stand in the Usmansky pine forest, Voronezh region (island forest of the forest-steppe of the Russian Plain), was studied as an indicator of the dynamics of climatic conditions and the basis of tree stand productivity. The cyclical dynamics of the increment of total, early and late wood of Scots pine over a period of more than a century was revealed, due to the influence of growth-limiting climate factors. In the dynamics of fluctuations in the total width of tree rings and early wood of Scots pine, as well as the growth-limiting factor, atmospheric precipitation, the Brickner cycle prevails, lasting 32, 40-41 years. The 11- and 24-year cycles are also clearly visible. In the dynamics of latewood fluctuations, the 10-11-year cyclicity is most pronounced. In solar activity fluctuations, the leading one is the 10-11-year cyclic component. Fluctuations in the hydrothermal coefficient are dominated by a high-frequency component (2-4 years); low-frequency cyclicity is also present (73, 50, 38 years, etc.). Correlations and the strength of influence of key limiting factors for the Central forest-steppe have been established: the amount of precipitation and air temperatures. The importance of March precipitation for the formation of early wood and April precipitation of late wood was revealed. For May-August, there is a clearly expressed positive correlation with precipitation (up to 0.42 in May for early wood) and a negative correlation with temperature (up to -0.3 for early wood, also in May). The correlation coefficient with the HTC is significantly higher than with precipitation and temperature separately for all types of wood. The relationship is positive and significant (0.52-0.55). The strength of influence on the formation of the width of annual rings is also maximum for HTC (up to 81 % for late wood). A preliminary assessment of carbon sequestration by mature pine plantations was carried out. It was revealed that one average tree of a 150-year-old forest stand deposited 12.8 g of carbon on average over the last 10 years (2013-2022).

Keywords: Scots pine, *Pinus sylvestris* L., dendroclimatology, limiting factors, correlations, carbon sequestration

Funding: the research was supported by the Russian Science Foundation grant No. 21-14-00233 "From cells to trees: biomechanics of wood through multiscale physical-mechanical and thermographic studies of subcellular, cellular and supracellular structures of annual growth rings".

Was carried out within the state assignment of Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (theme No. 1023013000012-7 "Biogeochemical monitoring of the carbon cycle in natural and anthropogenic ecosystems of the Voronezh region under conditions of global climate change (FZUR-2023-0001)").

Acknowledgments: The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of the article.

Conflict of Interest: The authors have declared no conflict of interest.

For citation: Matveev S. M., Litovchenko D. A. (2023). Dendroclimatology of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in the Usmansky pine forest conditions of Voronezh region. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], Vol. 13, No. 4 (52), part 2, pp. 110-136 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.4/20>.

Received 27.10.2023. *Revised* 04.12.2023. *Accepted* 11.12.2023. *Published online* 16.01.2024

Введение

Лесные экосистемы являются наиболее продуктивными, сложными и эволюционно развитыми типами ландшафтов биосферы Земли. Механизмы адаптации лесных сообществ в целом, и их основного компонента – древостоев, к обостряющейся в 21-м веке проблеме изменений климата продолжают совершенствоваться [1, 2]. Особенно информативны процессы ответных реакций древостоев на климатическую динамику в регионах, представляющих собой экотоны, переходные формации от леса к тундре (лесотундра) [3, 4], от леса к степи (лесостепь) [5-8]. В лесном фонде Воронежской области, расположенной в лесостепной зоне Русской равнины, сосна обыкновенная вторая по распространённости (после дуба) лесообразующая порода – 26% лесов.

Комплексным показателем, отражающим условия роста древостоев, изменение их состояния, с учётом вклада климатической составляющей, является прирост деревьев по диаметру [9-11]. Циклическая динамика прироста отражает соответствующие колебания климатических факторов (внутригодовые и межгодовые), оказывающих ключевое влияние на формирование древесины [12-14]. В формирование ранней и поздней части годичного слоя не одинаковый вклад вносят помесные значения лимитирующих факторов (сумм атмосферных осадков и температур воздуха) [15, 16].

Выявление вклада отдельных параметров климата и их динамики в формирование годичного кольца дерева за длительный период (более 100 лет), при наличии климатических рядов такой

длительности и деревьев соответствующего возраста, представляет значительный научный интерес и перспективу для прогнозирования будущей динамики означенных характеристик.

Кроме того, актуальной задачей является получение достоверной информации о количественных значениях депонирования углерода в стволовой древесине.

Целью данного исследования является анализ динамики радиального прироста сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) на постоянной пробной площади карбонового полигона ВГЛТУ, как индикатора динамики климатических условий и основы продуктивности древостоя.

Материалы и методы

Предмет и объект исследований

Объектом исследований является сосновый древостой Усманского бора Воронежской области (островной бор лесостепи Русской равнины), на территории Левобережного участкового лесничества Пригородного лесничества, квартал 60, выдел 11 (рис. 1). Древостой естественного происхождения, произрастает на супесчаных почвах, в типе лесорастительных условий (ГЛУ) свежая суборь (B_2), тип леса – сосняк травяной с дубом (ССРТ) (рис. 2). Условный средний возраст древостоя (на высоте 1 м от поверхности земли) – 150 лет, разбегка в возрасте – до двух классов (± 20 лет) (табл. 1). Отбор кернов сосны обыкновенной проведён 25 марта 2023 года.

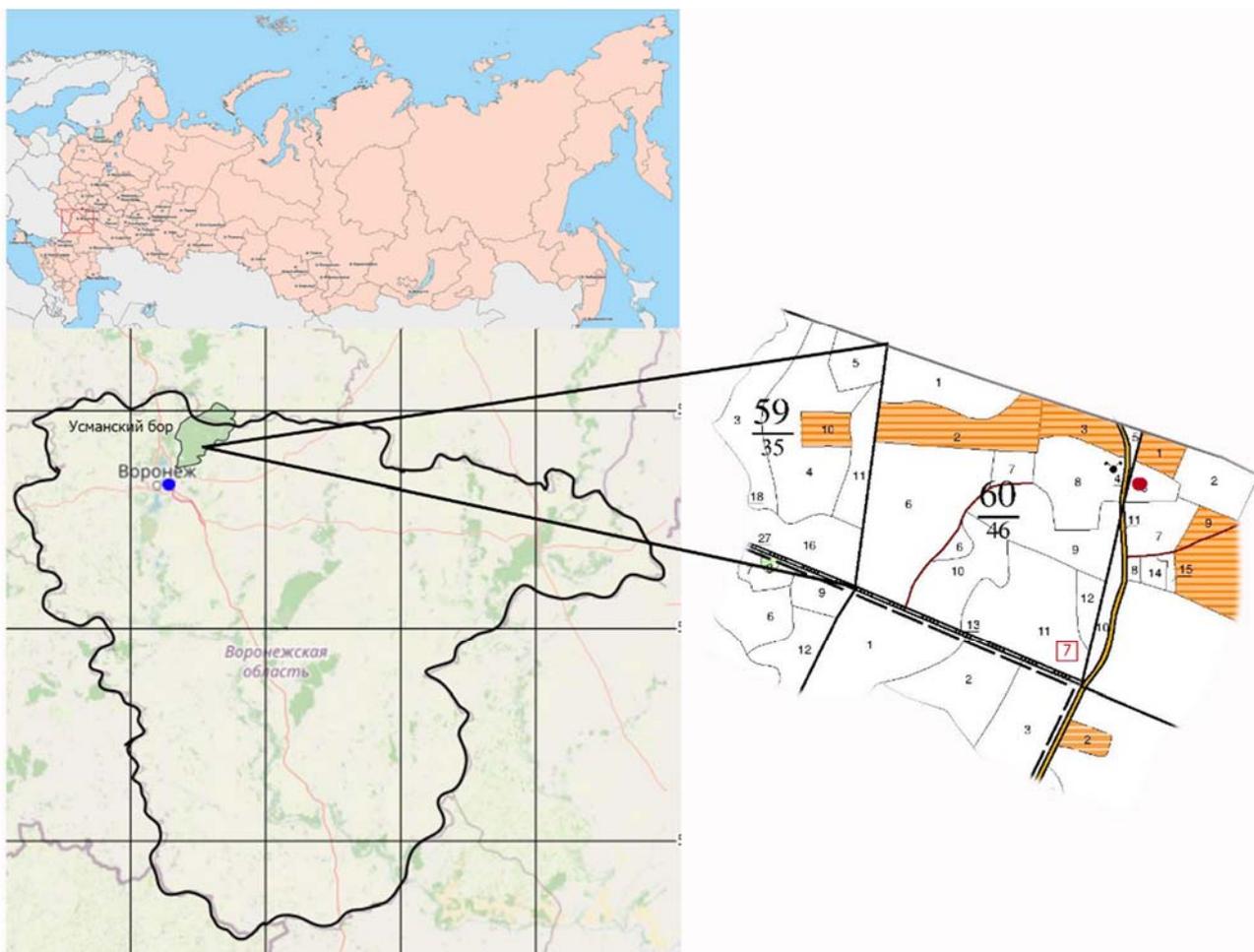


Рисунок 1. Схема расположения объекта исследований

7 – 7 – постоянная пробная площадь (ППП);

● – автоматическая метеостанция карбонового полигона ВГЛТУ;

● – метеостанция № 34123 «Воронеж».

Figure 1. Location diagram of the research object

7 – 7 – permanent trial area (PPP);

● – automatic weather station of the carbon polygon of VSUFT;

● – weather station "Voronezh".

Источник: лесоустроительный планшет № 6 Левобережного участкового лесничества [17]

Source: author's own composition



Рисунок 2. Сосновый древостой на объекте исследований

Figure 2. Pine stand at the research site

Источник: собственная композиция автора

Source: author's own composition

Таблица 1

Таксационная характеристика соснового древостоя на постоянной пробной площади карбонового полигона ВГЛТУ (квартал № 60; выдел 11) на 1 га

Table 1

Taxation characteristics of a pine tree stand on a permanent sample area of the carbon polygon of VSUFT (quarter No. 60; section 11) per 1 ha

ТЛЮ / тип леса forest growth conditions / type of forest	Состав composition of tree species	Условный средний возраст, лет Conditional average age, years	Средние		Густота, шт density, pieces	Полнота density of tree placement	Кл. бонитета growth class	Запас, м ³ Standing volume, m ³ /ha
			высота, м mean height, m	диаметр, см mean diameter on breast height, m				
В ₂ / ССРТ	10С	150	29.5	42	244	0.80	II	424
	Б, Ос, Д					0.01		1
	Итого					0.81		451

Источник: собственные измерения и вычисления автора

Source: author's own measurements and calculations

Сбор данных

Отобраны возрастным буравом и проанализированы керны с 24 деревьев, датированы 23 керна (кроме керна № 13). Группа из девяти более молодых деревьев (компактно произрастающих на пологом склоне оврага), возрастом 80-130 лет исключена из дальнейшего анализа. Для анализа динамики радиального прироста и связей с климатическими факторами отобраны 14 кернов (№ 1-9, 11, 12, 14, 15, 24), относительно одновозрастных: длина возрастного ряда на высоте 1 м от уровня земли составила от 143 до 165 лет (один класс возраста), что позволяет сравнить значения прироста в абсолютных величинах (мм), а также рассчитать средние значения до проведения индексирования. Относительная одновозрастность обследованных деревьев позволяет провести оценку депонирования углерода для данной возрастной группы.

Для оценки отклика прироста деревьев использовались ежемесячные климатические ряды приземных температур воздуха и атмосферных осадков по метеостанции № 34123 «Воронеж» (51°42'55" с.ш., 39°12'57" в.д.) [18]. Расстояние от метеостанции «Воронеж» до пробной площади составляет 13 км. На карбоновом полигоне также имеется автоматическая метеостанция (51°48'50" с.ш., 39°19'37" в.д.), установленная в июле 2022 г. Данные автоматической метеостанции за 10 месяцев использованы для предварительной оценки поля температуры и сумм атмосферных осадков в районе пробной площади и на метеостанции «Воронеж». В дальнейшем анализе они не использовались.

Нами также использовались значения гидротермического коэффициента Селянинова (ГТК) [19] за 149 лет (1873-2021 гг.) рассчитанные Матвеевым С.М. по данным метеостанции «Воронеж» [18] за период май-сентябрь (т.е. с температурой воздуха больше 10 °C), по следующей формуле:

$$\text{ГТК}_{\text{м-с}} = \frac{\sum P_{\text{м-с}}}{\sum_{\text{ср.}} t^{\circ}\text{C}_{\text{м-с}} \times 3,06} \quad (1)$$

где, ГТК м-с – ГТК за период май-сентябрь;

$P_{\text{м-с}}$ – сумма осадков за период май-сентябрь;

t° – температура воздуха.

Данные чисел Вольфа характеризующих солнечную активность взяты по Цюрихскому ряду в версии 1.0 SILSO [20].

Анализ данных

Проведён сравнительный анализ данных недавно установленной на карбоновом полигоне автоматической метеостанции и данных метеостанции «Воронеж» ряд наблюдений (с 1862 г. по атмосферным осадкам и с 1873 г. по температуре воздуха). Ряд наблюдений на метеостанции «Воронеж» почти совпадает по длительности с возрастом деревьев на пробной площади.

Данные температур воздуха с двух метеостанций, практически одинаковы, что отражено на приведённом графике (рис. 3). Анализ сумм атмосферных осадков по двум метеостанциям показал, что, осадков в районе объекта исследований выпадает больше, при синхронной динамике колебаний на обеих метеостанциях. Данные по количеству осадков на автоматической метеостанции имеются за короткий период, только тёплых месяцев и требуют уточнения.

С использованием установки LINTAB-6 и пакета программ TSAP-Win [5] проведены измерения ранней и поздней древесины и общей ширины годичного кольца отобранных кернов сосны обыкновенной (далее – виды древесины).

Для удаления возрастного тренда и обеспечения возможности сопоставления динамики радиального прироста с климатическими параметрами рассчитаны относительные индексы в программе TREND [21], по общепринятой методике [22 и др.]. Возрастной тренд рассчитан методами скользящего сглаживания, с различным периодом осреднения, и последующего выравнивания полиномиальной функцией.

В аналитическом пакете STATISTICA 13.0 [23, 24] рассчитаны статистические параметры дендрохронологического ряда длительностью 164 года: средние значения ширины годичных колец по видам древесины, коэффициент изменчивости, стандартное отклонение, вероятная ошибка, точность исследования. Также в пакете STATISTICA рассчитаны значение соотношения сигнал-шум (SNR) и выраженный сигнал популяции (EPS).

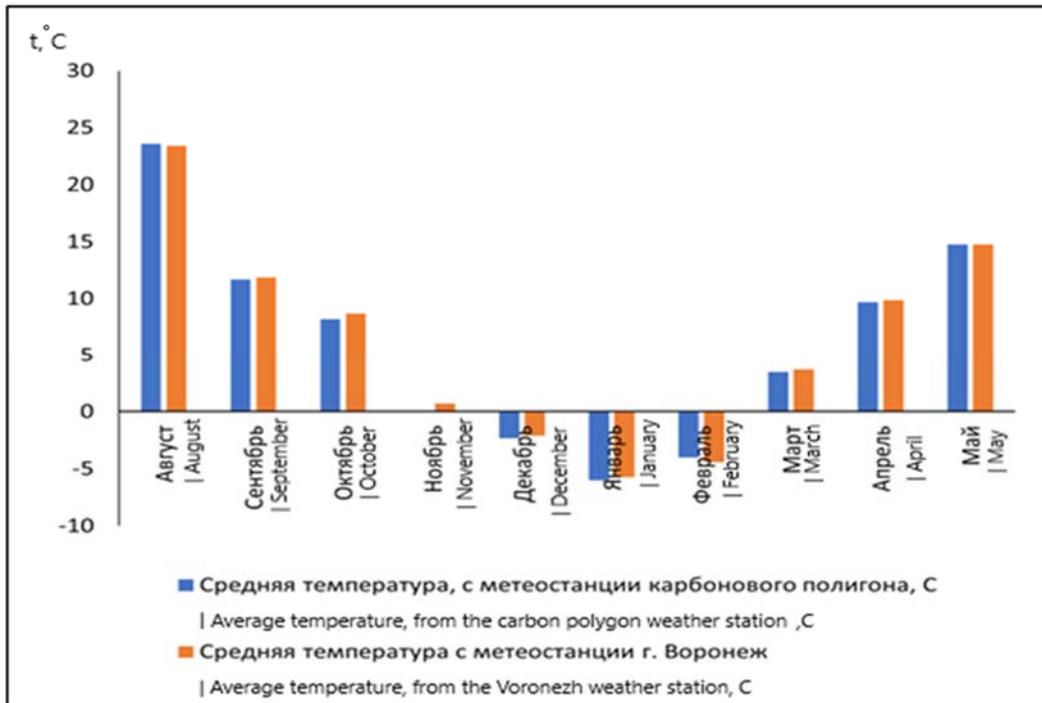


Рисунок 3. Динамика температур воздуха по данным автоматической метеостанции «Карбоновый полигон ВГЛУТУ» и метеостанции № 34123 «Воронеж»

Figure 3. Dynamics of air temperatures according to the automatic weather station "Carbon Polygon of VSUFT" and weather station No. 34123 "Voronezh"

Источник: собственная композиция автора

Source: author's own composition

В пакете программ TSAP-Win (версия профессиональная) [25] нами рассчитаны статистические коэффициенты, характеризующие сходство индивидуальных хронологий ширины годичных колец с осредненной хронологией по всем образцам в исследуемом древостое: коэффициент синхронности (GLK), уровень синхронности (GSL), коэффициент корреляции (CC), коэффициент чувствительности (K_s), а также индекс перекрестного датирования индивидуальных хронологий со средней (CDI) [22, 26].

Коэффициент синхронности (GLK) оценивает в процентах отношение количества однонаправленных изменений между календарными годами для двух хронологий к общему числу лет [22].

$$GLK = \frac{n^+}{n-1} 100 \%, \quad (2)$$

где, n^+ – количество однонаправленных изменений двух сравниваемых хронологий;

n – общее число лет сравниваемых хронологий. Значение коэффициента синхронности (GLK) меньше 67 % означает низкую синхронность индивидуальных рядов со средним, т.е. значительные индивидуальные особенности и различия динамики прироста исследуемых образцов. Высокие значения коэффициента синхронности (79-100 %) означают наличие сильного климатического сигнала в исследуемом древостое.

Уровень синхронности (GSL) ниже 56 % означает отсутствие синхронности, синхронность от 57 до 60 % помечается одной звездочкой (*), от 61 до 64 % – двумя, более 68 % – тремя звездочками.

Под коэффициентом чувствительности понимается относительная величина межгодовой изменчивости прироста в сериях годичных колец индивидуальных хронологий [26].

$$K_s = \frac{n}{n-1} \sum_{t=1}^{n-1} \frac{2(x_{t+1} - x_t)}{(x_{t+1} - x_t)}, \quad (3)$$

где, x_i – ширина годичного кольца, или индекс прироста в год;

t, n – длительность ряда (лет).

Индекс перекрестного датирования индивидуальных хронологий со средней (CDI) – комбинированный показатель, объединяющий значения коэффициента корреляции (CC), критерия вероятности Стьюдента (t_{st}), а также коэффициента синхронности (GLK). Индекс выражается в процентах и считается достоверным при значениях $> 10\%$.

Спектральный анализ цикличности (с помощью сглаживания весами Хемминга) в динамике колебаний относительных индексов радиального прироста сосны обыкновенной, солнечной активности, выраженной в числах Вольфа, лимитирующего прирост фактора – сумм атмосферных осадков, температур воздуха, а также комплексного показателя засушливости и увлажнения – ГТК Селянинова, позволил выявить ключевые экстремумы (ведущие циклы) в рядах названных величин. Кросс-спектральный анализ позволил выявить совмещенные экстремумы циклических составляющих в рядах названных величин. Анализ проведен в программе STATISTICA 13.0. [23, 24].

Количественные характеристики связи относительных индексов радиального прироста сосны обыкновенной и лимитирующих факторов климата (сумм атмосферных осадков и средних температур воздуха) определены с помощью линейной корреляции Пирсона в пакете программ Microsoft Excel 2020:

$$r_{xy} = \frac{\sum(x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum(y_i - \bar{y})^2}}, \quad (4)$$

где, x_i – значения даты в выборке X,

y_i – значения даты в выборке Y;

\bar{x} – среднее арифметическое в выборке X;

\bar{y} – среднее арифметическое в выборке Y.

В соответствии со шкалой Чеддока [24], связь считается слабой от 0 до 30 %, умеренной от 31 до 50%, значительной от 51 до 70 %, высокой (тесной) от 71 до 90 %, очень высокой (очень тесной) от 91 % и больше.

Статистическая значимость связи между факторами оценивается критерием Стьюдента (t_{st}) в зависимости от объема выборки выборочного исследования. При значении критерия Стьюдента расчетного ($t_{st(r)}$) больше табличного (критического)

($t_{st(k)}$) связь является значимой при уровне значимости $p=0,05$.

$$t_{расч.} = \sqrt{\frac{r^2}{1-r^2}} (n - 2), \quad (5)$$

где, n – количество наблюдений в выборке.

Так как длительность ряда температуры ограничена 1873 годом, период оценки связей климатических параметров и прироста взят 149-летний (1873-2021 гг.).

Сила влияния внешних факторов оценивается как отношение факториальной суммы квадратов (Df) к общей сумме квадратов (Dc), дисперсионного комплекса.

Нами рассчитан показатель силы влияния метеорологических факторов на радиальный прирост древесины по формуле (6) (STATISTICA - 13.0):

$$\eta^2 = \frac{Df}{Dc}, \quad (6)$$

Значения относительных индексов прироста взяты в качестве результирующего признака, а факторы климата в качестве независимых переменных. Если фактическое значение F -критерия выше табличного $Ff > Fst$, признается статистическая значимость уравнения в целом.

Для получения информации о продуктивности древостоя и депонировании углерода древесиной, рассчитан погодичный объемный прирост за последние 10 лет жизни деревьев с учётом практически не изменяющейся высоты древостоя в этот период. На основании данных о среднем радиальном годичном приросте рассчитывались площади годичных слоев (прирост по площади сечения ствола). Годичный объемный прирост одного дерева (среднего) рассчитывался по формуле [27]:

$$Z_v = Z_{s 1,0} \times H \times 0,76 \quad (7),$$

где, Z_v – годичный объемный прирост среднего дерева;

H – высота ствола;

$Z_{s 1,0}$ – прирост по площади годичного слоя в соответствующий год на высоте 1,0 м (рассчитывался как разность площади большего и меньшего кругов $\pi R_1^2 - \pi R_2^2 = Z_{s 1,3}$).

Объемный прирост древесины может быть принят в качестве накопленной фитомассы за год и

переведен в объём сухой древесины через конверсионный коэффициент 0,5. Для перехода к весовым единицам (т/га) сухого вещества, нужно умножить

объём годичной фитомассы на условную плотность древесины сосны обыкновенной (0,4).

Результаты и обсуждение

Статистические характеристики радиального прироста сосны обыкновенной представлены в табл. 2.

Выраженный сигнал популяции (EPS) в исследуемой обобщенной древесно-кольцевой хронологии составил 0,99, что выше принятого порогового значения – 0,85, т.е. хронология является представительной – осреднённая ширина годичных ко-

лец за каждый год достоверно отражает прирост всей совокупности.

Значение соотношения сигнал-шум (SNR) – 78, что говорит о высокой изменчивости в обобщенной хронологии. Данная изменчивость обусловлена влиянием климатических факторов, т.е. исследуемые деревья обладают высокой чувствительностью к изменениям климата.

Таблица 2
Статистические характеристики осредненных рядов радиального прироста сосны обыкновенной (*P. sylvestris* L.)

Table 2

Statistical characteristics averaged series of the radial increment of Scots pine (*P. sylvestris* L.)

Вид древесины type of wood	Период лет 1859-2022 period of years 1859-2022	M, мм	m _m	C, %	M _c	t _m	P _M , %
Общая ш.г.к.* General TRW	164	1,2	0,05	44,5	0,01	7,1	6,5
Ранняя Early	164	0,7	0,08	55,6	0,02	8,9	7,0
Поздняя Late	164	0,4	0,09	50,4	0,03	10,2	8,0

Примечание: *Общая ш.г.к. – общая ширина годичного кольца; M – среднеарифметическая величина; m_m – основная ошибка среднего значения; C – коэффициент вариации; M_c – ошибка коэффициента вариации; t_m – показатель достоверности среднего значения; P_M – показатель точности исследования | Note: General TRW – total width of the growth ring; M – arithmetic mean value; m_m is the main error of the average value; C – coefficient of variation; M_c – coefficient of variation error; t_m – indicator of reliability of the average value; P_M – is an indicator of the accuracy of the study.

Источник: собственные измерения и вычисления автора

Source: author's own measurements and calculations

За период роста древостоя выявлены повторяющиеся практически у всех деревьев широкие годичные кольца: 1890, 1913, 1930, 1937, 1945, 1947, 1955, 1958, 1962, 1990, 2004, 2018, 2020 – 2022 гг.; а также – узкие годичные кольца: 1881, 1882, 1901, 1905, 1910, 1911, 1921, 1924, 1931, 1936, 1939, 1940, 1942, 1946, 1949, 1950, 1952, 1954, 1964, 1972, 1976, 1992, 2010 – 2013, 2015 гг. (рис. 4, 5)

В 2010-2013 гг., вследствие чрезвычайной засухи 2010 г. (рис. 4), зафиксированы наименьшие

значения ширины годичных колец в исследуемом древостое, у нескольких образцов прирост 2012 или 2013 гг. не сформировался. Одним из наиболее широких годичных колец за период роста древостоя является кольцо 1990 г.

По утверждению ряда учёных [28, 29], 1990 год является пиком 179-летнего цикла колебаний Солнечной системы. Также, отмечено, что в ряде кернов 1897 год имеет ярко выраженное ложное кольцо (рис. 5).



Рисунок 4. Фрагмент керна древесины № 5

Figure 4. Wood core fragment No. 5

Источник: собственная композиция автора

Source: author's own composition



Рисунок 5. Фрагмент керна древесины № 8 с ложным кольцом в 1897 году

Figure 5. Wood core fragment No. 8 with false ring in 1897

Источник: собственная композиция автора

Source: author's own composition

Анализ значений коэффициента синхронности (GLK) отдельных хронологий годовичных колец со средней хронологией показал, что диапазон

колебаний по всем видам древесины значителен: 59–81 % (табл. 3).

Таблица 3

Значения статистических коэффициентов (GLK, GSL, CC, CDI, K_s) осредненных хронологий радиального прироста деревьев сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) по видам древесины, Левобережное участковое лесничество Пригородного лесничества

Table 3

Values of statistical coefficients (GLK, GSL, CC, CDI, K_s) of averaged chronologies of radial growth of Scots pine trees (*Pinus sylvestris* L.) by wood type, Levoberezhnoe district forestry Prigorodnoe forestry

Вид древесины type of wood	GLK, %	GSL (*)	CC, %	CDI, %	K_s
Общая ш.г.к.* General TRW	77	3	79	75	0,37
Ранняя Early	75	3	77	56	0,32
Поздняя Late	73	3	64	25	0,42

Примечание: *Общая ш.г.к. – общая ширина годовичного кольца | Note: General TRW – total width of the growth ring

Источник: собственные измерения и вычисления автора

Source: author's own measurements and calculations

Самое низкое значение, 59 %, низкий уровень синхронности по шкале С.Г. Шиятова [22], наблюдается лишь у одного образца, № 4, и только для ранней древесины. Во всех остальных случаях, по всем видам древесины наблюдается средний или высокий уровень синхронности.

Осреднённые значения синхронности по видам древесины соответствуют среднему уровню по шкале С.Г. Шиятова [22]: по общей ширине годичного кольца 77 %; по ранней древесине 75 %; по поздней древесине 73 %.

Уровень синхронности (GSL) для всех образцов по всем типам древесины высок, его значение 3 (***) , за исключением одного образца № 4, показавшего низкую синхронность ранней древесины, значение – 1 (*).

Значения коэффициентов корреляции (СС, %) сильнее варьируют по отдельным образцам. Поздняя древесина в образцах № 12 и № 24, демонстрирует низкие значения – 44 % и 48 % соответственно, т.е. умеренную корреляцию со средним. Однако по ранней древесине и общей ширине годичного кольца названные образцы показали более высокую связь. Образец № 12 показал по общей древесине значение СС, % = 63 % (значительная связь), по ранней древесине СС, % = 71 % (тесная связь). Образец № 24 показал также высокие значения корреляции по общей ширине годичного кольца и ранней древесине, соответственно: СС, % = 77 % (тесная связь), СС, % = 80 % (тесная связь). Среднее значение коэффициента корреляции по общей ширине годичного кольца: 79 % (тесная связь), диапазон колебаний от 61 % до 91 %; по ранней древесине – 77 % (тесная связь), диапазон колебаний от 56 % до 90 %. Поздняя древесина по-

казала наиболее низкие значения коэффициента корреляции. Среднее значение: 64 % (значительная связь), при диапазоне колебаний от 44 и 48 % (два образца), остальные – от 55 % до 78 %.

Так как полученные коэффициенты чувствительности больше порогового значения 0,3 (0,32 по ранней древесине; 0,42 по поздней древесине), то можно сделать вывод о достаточно высокой чувствительности обследованного древостоя к влиянию внешних факторов.

Индекс перекрестного датирования (CDI) является интегральным показателем, рассчитываемым для двух серий ширины годичных колец с на основе нескольких статистических параметров. Наиболее низкое значение по индексу перекрестного датирования (CDI), как и по коэффициенту синхронности, показал образец № 4 по поздней древесине – 15 %.

Осреднённые значения индекса перекрестного датирования наиболее низкие по поздней древесине – 25 %, при диапазоне колебаний от 15 % до 41 %. Более чем вдвое выше данный индекс по ранней древесине – 56 % и самый высокий по общей древесине – 75 %.

Анализ спектральной плотности рядов радиального прироста сосны обыкновенной (общей ширины годичного кольца, ранней и поздней древесины) показал следующее (рис. 6).

В динамике колебаний общей ширины годичных колец (в абсолютных величинах) и ранней древесины проявляются длительные циклы (82; 55 лет), цикл Брикнера (32; 41 год), а также хорошо выражен цикл Швабе-Вольфа (10,5 лет).

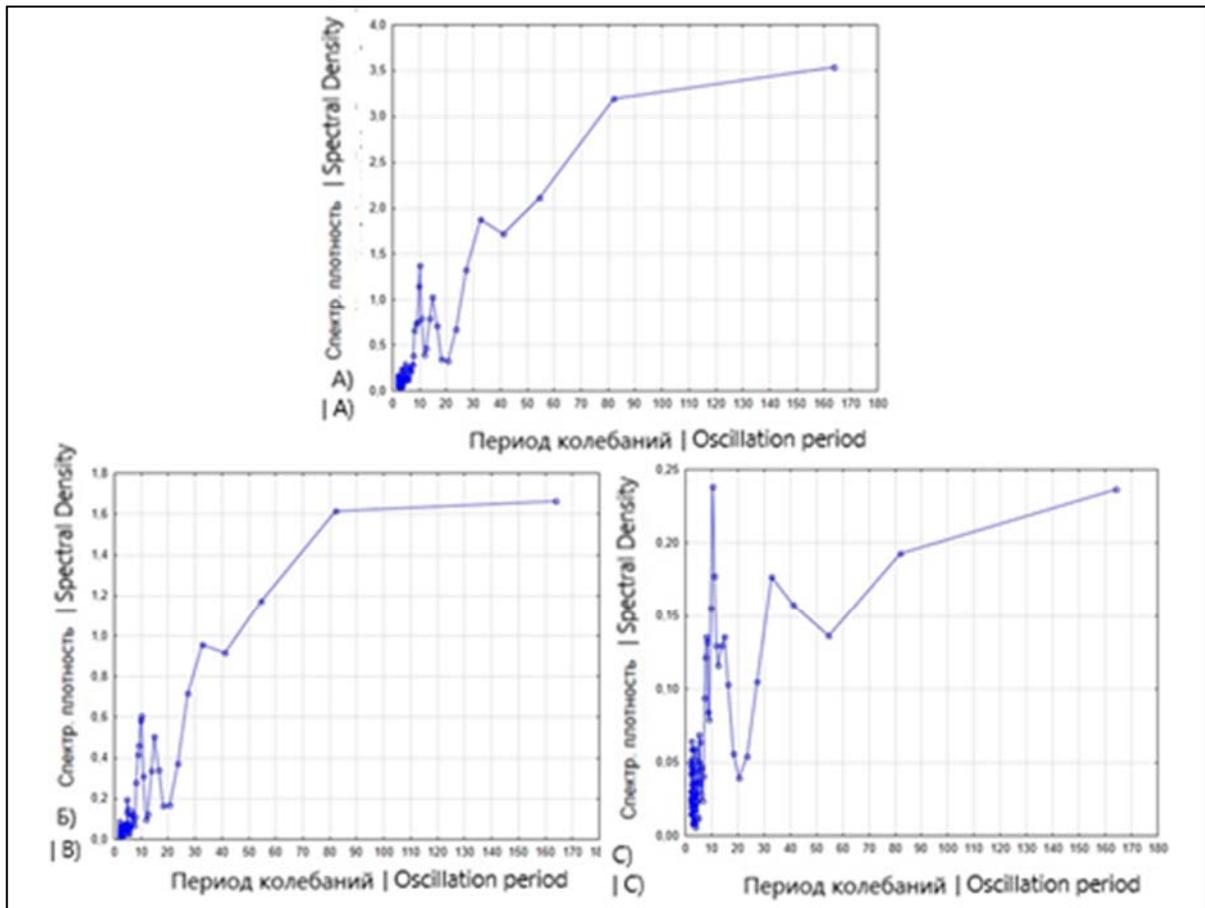


Рисунок 6. Спектральная плотность относительных индексов радиального прироста сосны обыкновенной (*P. sylvestris* L.) по видам древесины по периоду: А) общая ширина годичного кольца; Б) ранняя древесина; В) поздняя древесина

Figure 6. Spectral density of relative indices of radial growth of Scots pine (*P. sylvestris* L.) by type of wood by period: A) total width of the growth ring; B) early wood; C) late wood

Источник: собственная композиция автора

Source: author's own composition

В ряду значений спектральной плотности поздней древесины (в абсолютных величинах) пики периодограммы расположились следующим образом: 10,5; 82; 11; 32; 41; 10; 55; 16. Однако 10-11-летняя цикличность (цикл Швабе-Вольфа) абсолютно превалирует над циклами другой длительности (таблица 4).

Спектральный анализ климатических показателей (атмосферные осадки (P, мм), гидротермический коэффициент увлажнения Селянинова (ГТК), температура воздуха (t, °C)), а также солнечной активности (W) выявил ведущие циклы в спектре их колебаний (рис. 7).

В спектре колебаний солнечной активности безусловно превалируют колебания длительностью

9-12 лет (ведущий цикл – 10,5 лет), но также вносят заметный вклад циклы длительностью 80; 55; 40 лет.

Периодограмма (рис. 7) показывает, что в ряду сумм атмосферных осадков наблюдаются циклы различной длительности. По убыванию спектральной плотности расположение циклов следующее: 40; 53; 80; 32; 2; 3; 11; 28.

В ряду значений ГТК по календарным годам наблюдаются циклы: 3; 73,5; 50; 3,5; 38; 2; 15; 24. При этом наиболее часто встречаются высокочастотные циклы (2-3 года), около 74 лет и полувекковой цикл – 50 лет. Значимые циклы в спектре колебаний температуры воздуха по периоду следующие: 73; 3; 11; 9; 12; 49,5; 8; 16.

Таблица 4

Иерархия циклов разной частоты по видам древесины в абсолютных величинах (общая ширина годичного кольца, ранняя, поздняя), солнечной активности, ГТК, сумм атмосферных осадков за календарный год и среднегодовых температур воздуха (по данным метеостанции «Воронеж») по результатам спектрального анализа

Table 4

Hierarchy of cycles of different frequencies by type of wood in absolute values (total width of the growth ring, early, late), solar activity, HTC, amounts of atmospheric precipitation for a calendar year and average annual air temperatures (according to the Voronezh weather station) based on the results of spectral analysis

№ п/п No.	Значимые циклы в спектре колебаний Significant cycles in the spectrum of oscillations						
	Общая ширина годичного кольца General TRW	Ранняя древесина Early wood	Поздняя древесина Late wood	Солнечная активность Solar Activity	ГТК Hydrothermal coefficient	Сумма атмосферных осадков за год Amount of atmospheric precipitation for the year	Среднегодовая температура воздуха Average annual air temperature
1	82	82	10,5	10,5	3	40	73
2	55	55	82	10	73,5	53	3
3	32	32	11	11	50	80	11
4	41	41	32	9	3,5	32	9
5	10,5	28	41	12	38	2	12
6	10	10,5	10	80	2	3	49,5
7	28	10	55	55	15	11	8
8	16	16	16	40	24	28	16

Источник: собственные измерения и вычисления автора

Source: author's own measurements and calculations

Годичный прирост древесины хвойных деревьев для выделения климатических ритмов вне периода метеонаблюдений и прогноза изменений климата использовала также М.Д. Олейник на территории Ачинско-Боготольской лесостепи [30]. Канг Ш. и др. [31] объединили 12 опубликованных хронологий годичных колец и 12 индексов сухости/влажности (DWI) для реконструкции изменчивости сухого и влажного климата в Северо-Центральном Китае. Авторы выявили значимую реакцию на сигналы влажности теплого сезона (май-июнь-июль-август-сентябрь), а также реконструкция показала значительные межгодовые спектральные пики в частотной области 2–7 лет вместе с относительно более слабыми декадными частотами 16, 24 и 78 лет.

Wenxuan Pang и др., [32] (Южный Горный Алтай, Китай); Zhang, T. и др. [33] (пойма реки Хаба, Китай), Zhang R.B и др. [34] (южный склон гор Алтая, Китай), Jiang S.X. и др. [35] (верхний бассейн реки Иртыш, Китай), Shang H.M. и др. [36] (Северный Казахстан) в реконструированных по дендроклиматическим данным рядах осадков, температур, речного стока установили повторяемость циклов длительностью 2-4 года, 11-12 лет, 24 года, 60 лет.

Для выявления сходства частотных пиков в цикличности колебаний радиального прироста древесины сосны обыкновенной с климатическими показателями и солнечной активностью проведён кросс-спектральный анализ периодов колебаний. Спектральный анализ ширины годичных колец в абсолютных величинах и относительных индексах

не показал существенных отличий в иерархии циклов разной частоты по всему спектру колебаний. Для кросс-спектрального анализа использовали

ширину годовых колец, выраженную в относительных индексах (%).

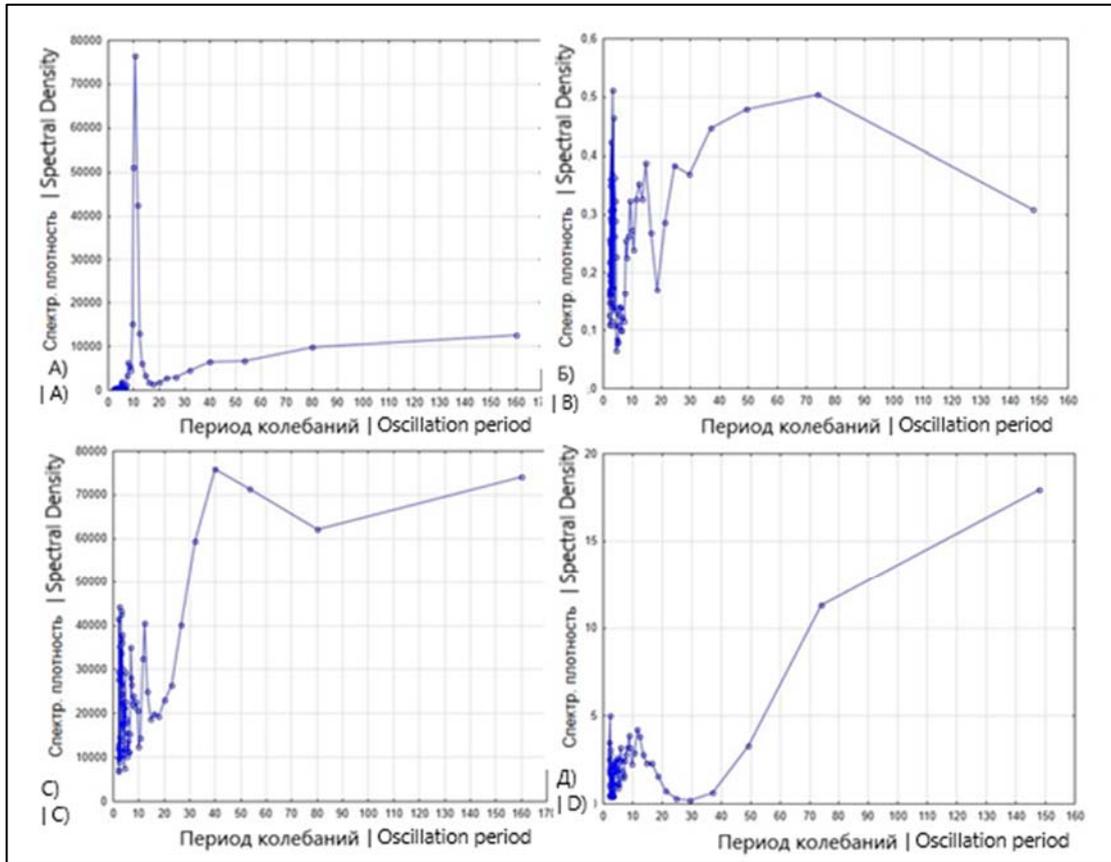


Рисунок 7. Спектральная плотность рядов по периоду: А) солнечная активность (W); Б) гидротермический коэффициент увлажнения Селянинова (ГТК); С) сумма атмосферных осадков за год ($P_{год}$); Д) температура воздуха (t)

Figure 7. Spectral density of series by period: A) solar activity (W); B) Selyaninov's hydrothermal humidification coefficient (HTC); C) the amount of atmospheric precipitation for the year (P_{year}); D) air temperature (t)

Источник: собственная композиция автора

Source: author's own composition

Кросс-спектральный анализ общей ширины годовых колец и солнечной активности показал наиболее значимые совпадения частот колебаний в следующем порядке: 40; 10,5; 54; 11; 32. Т.е., наиболее выражены циклы Брикнера (40; 32 года) и Швабе-Вольфа (10,5; 11 лет), а также полувековой цикл – 54 года (табл. 5).

Wenxuan Pang и др., [32] при реконструкции динамики атмосферных осадков за 403 года выявили общий высокоинтенсивный 11-летний цикл связанный с солнечной активностью.

При кросс-спектральном анализе спектральной плотности совмещенных рядов ГТК и индексов прироста по общей и ранней древесине наиболее выражены 30-38-летние колебания, а также 24-летний цикл (магнитный или Хейла). Кросс-спектральный анализ сумм атмосферных осадков и индексов прироста по всем видам древесины выявил превалирование 40- и 32-летних циклических составляющих (цикл Брикнера).

Таблица 5

Иерархия циклов разной частоты в совмещённых рядах относительных индексов радиального прироста по видам древесины (общая ширина годичного кольца, ранняя, поздняя) и, соответственно: солнечной активности, ГТК, сумм атмосферных осадков за календарный год и среднегодовых температур воздуха (по результатам кросс-спектрального анализа)

Table 5

Hierarchy of cycles of different frequencies in combined series of relative indices of radial increment by type of wood (total width of the growth ring, early, late) and, accordingly: solar activity, hydrothermal complex, amounts of atmospheric precipitation for a calendar year and average annual air temperatures (based on the results of cross-spectral analysis)

Вид древесины type of wood	Значимые циклы (лет) в спектре колебаний (в порядке значимости) Significant cycles (years) in the spectrum of fluctuations (in order of significance)			
	Солнечная активность Solar Activity	ГТК Hydrothermal coefficient	Сумма атмосферных осадков за год Amount of atmospheric precipitation for the year	Среднегодовая температура воздуха Average annual air temperature
Общая ширина годичного кольца General TRW	40; 10,5; 54; 11; 32	38; 30; 24; 14; 73	40; 32; 15; 11; 13	8; 2; 3-9; 16; 24
Ранняя древесина Early wood	10,5; 40; 53; 10; 11	14; 24; 38; 29,5; 21	40; 32; 15; 18; 11	8; 2,5; 9; 18; 24
Поздняя древесина Late wood	40; 11; 32; 53; 13	38; 29,5; 14; 49; 24	40; 32; 9; 9,5; 3,3	2,5; 3-9; 18; 16; 24,5

Источник: собственные измерения и вычисления автора
Source: author's own measurements and calculations

В Центральной лесостепи ключевым метеорологическим фактором, определяющим динамику радиального прироста деревьев, являются засухи, как следствие продолжительного отсутствия осадков в сочетании с высокими температурами воздуха. Для оценки степени интенсивности и повторяемости засух широко используется гидро-термический коэффициент Селянинова (ГТК) [37, 38].

Слабые засухи проявляются при значении ГТК менее 1.0, средние – менее 0.8, сильные – менее 0.6 [19, 38]. За период с 1873 по 2022 гг. среднее значение ГТК составило 1.06. Значение ГТК < 0.6 наблюдалось в 1889, 1891-1893, 1897, 1924, 1938-1939, 1963, 1971 гг. В 1972, 2009, 2020 гг. зна-

чения ГТК – 0.64, 0.63, 0.62 соответственно. Наименьшее значение ГТК Селянинова выявлено в 1891 г. – 0.42, в XX веке в 1971 г. – 0.52.

Совмещенный график динамики ранней, поздней древесины и ГТК (рис. 8) показал наиболее высокую амплитуду колебаний поздней древесины. Амплитуда всех трёх показателей наиболее высока в последние 45 лет (с 1975 года по н.в.). Все три графика показывают высокую частоту колебаний и значительное сходство в динамике колебаний.

Наиболее значительное падение прироста отмечено в 1871 (ранняя древесина), 1939, 1963-1964 гг., 1971-1975 гг., в 1992 г. (особенно для поздней древесины), в 2011-2013 гг. (только для ранней и поздней древесины).

Наиболее высокий прирост отмечен в 1885 г., в 1913 г. (по ранней древесине и ГТК), в 1945 г., в 1988 и особенно в 1990 гг., в 2004 году (особенно по поздней древесине).

Результаты анализа динамики ранней и поздней древесины с ГТК позволили выявить годы с падением прироста: 1881-1882, 1939, 1972, 1992, 2010, 2011 годы (рис. 8).

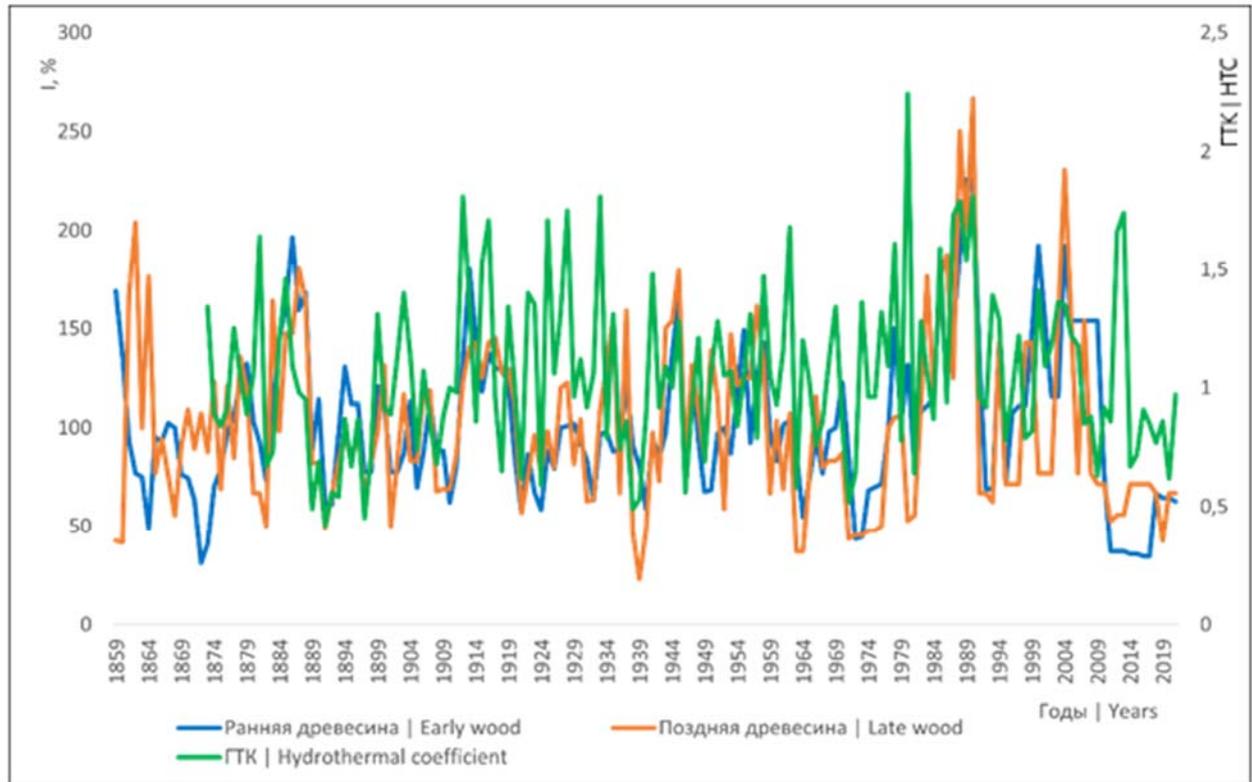


Рисунок 8. Динамика относительных индексов ранней, поздней древесины и гидротермического коэффициента по годам

Figure 8. Dynamics relative indices of early, late wood and hydrothermal coefficient by year

Источник: собственная композиция автора

Source: author's own composition

Для выявления значимости и силы связей исследуемых факторов, нами проведен корреляционный анализ относительных индексов прироста по видам древесины и климатических факторов (температуры воздуха (t , °C) и атмосферных осадков (P , мм) за гидрологический год). Проведенный анализ выявил ранее не наблюдавшуюся нами особенность связи относительных индексов прироста с осадками марта-апреля (рис. 9).

Для формирования ранней древесины оказались значимы мартовские осадки (положительная связь равная 0,19) и не значимы или нежелательны (отрицательная связь) – апрельские осадки. Для поздней древесины – наоборот: с мартовскими осадками корреляционная связь отрицательная, а с

апрельскими – положительная (0,22). В соответствии с имеющимся объемом выборки, значимой является величина коэффициента корреляции равная 0,16 ($t_{расч.} 1,979 > t_{крит} 1,972$)

Как по осадкам, так и по температурам выражено смещение значений климатических факторов по значимости на месяц для поздней древесины.

За все четыре месяца периода вегетации (непосредственно формирования клеток древесины, май-август) наблюдается ясно выраженная положительная корреляционная связь прироста ранней древесины с осадками (до 0,42 в мае). В то же время, отмечается отрицательная корреляционная связь с температурой (до -0,3 также в мае). В сен-

тябре текущего года, а также в октябре – ноябре предыдущего года, отрицательная связь ранней древесины с температурой также имеет место, но для поздней древесины связь с температурой в сен-

тябре является положительной. Связь с температурой становится положительной для всех видов древесины с декабря по апрель.

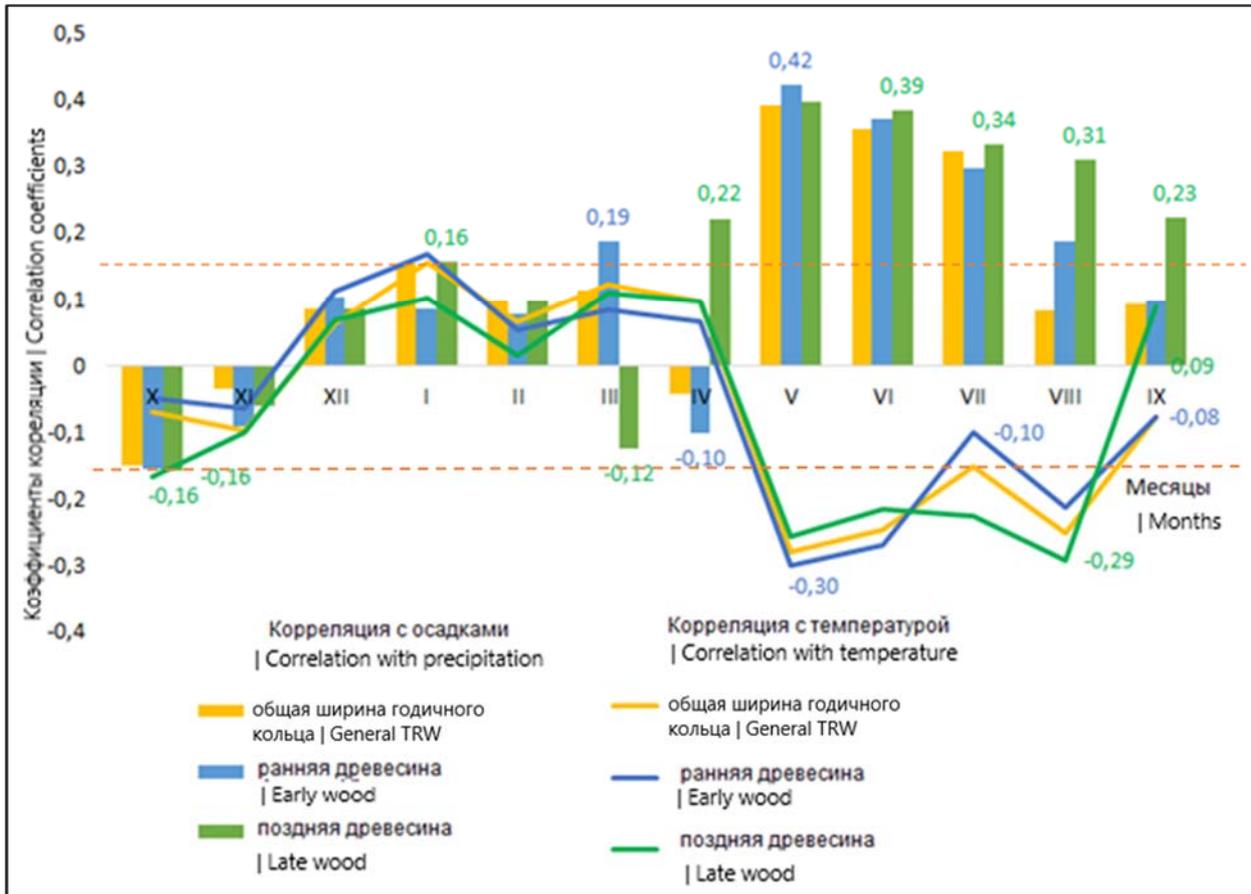


Рисунок 9. Корреляционная связь относительных индексов радиального прироста сосны обыкновенной (*P. sylvestris* L.) с суммами атмосферных осадков по метеостанции «Воронеж» (по месяцам гидрологического года) и средними температурами воздуха

Figure 9. Correlation between the radial increment relative indices of Scots pine (*P. sylvestris* L.) and the amount of precipitation at the Voronezh weather station (by month of the hydrological year) and average air temperatures

Источник: собственная композиция автора

Source: author's own composition

Отрицательная связь с осадками, также – для всех видов древесины, наблюдается в октябре и ноябре предыдущего года.

Прослеживается значительно более высокая реактивность поздней древесины по отношению к температурам сентября (+) и октября (-). В целом за период июнь-октябрь поздняя древесина показывает большую чувствительность к осадкам, чем ранняя.

По отношению к температурам воздуха поздняя древесина более чувствительна чем ранняя с июля по сентябрь и в октябре-ноябре предыдущего года.

А.В. Данчева и др. [39] выявили в сосновом древостое, произрастающем в относительно сухих лесорастительных условиях (группа типов леса – С₂) ленточных боров Прииртышья Восточного региона, снижение влияния на радиальный прирост температуры воздуха мая текущего года, и увели-

чение влияния температуры воздуха июля за последние 50 лет, а также общую тенденцию увеличения влияния температуры воздуха (август – сентябрь) и количества осадков (август) конца вегетационного сезона предшествующего года в течение последних 15-20 лет. Авторами также отмечается не стабильность во времени связи количества осадков июня-июля с годичным приростом сосны обыкновенной. Wenxuan Pang и др. [32] по образцам лиственницы сибирской реконструировали ход осадков в Алтайских горах Китая и проверили, влияют ли на его колебания крупномасштабные климатические циркуляции. Результаты исследований авторами климатического отклика показали, что индекс ширины кольца значительно положительно коррелировал с осадками с февраля по октябрь и с июля по август предыдущего года и значимо отрицательно коррелирует с температурой с мая по сентябрь и октябрь предыдущего года.

Значительная связь между температурой октября и хронологией, по-видимому, была результатом низкотемпературного стресса в конце сезона. Недостаток осадков с февраля по октябрь предыдущего года были основной причиной, сдерживающей рост лиственницы сибирской.

Проведённый нами корреляционный анализ связи ГТК Селянинова с относительными индексами радиального прироста по видам древесины (общая, ранняя, поздняя) сосны обыкновенной показал, что связь с ГТК значительно выше, чем с осадками и температурой по отдельности для всех видов древесины. Значения коэффициента корреляции (r) составили для общей древесины: 0,52; ранней: 0,55; поздней: 0,54. Связь положительная, значительная.

Прямолинейная корреляционная связь солнечной активности с относительными индексами радиального прироста для всех видов древесины не значима (0,11-0,13) (табл. 6).

Дисперсионный анализ выявил, что основные климатические факторы, влияющие на годичный прирост сосны обыкновенной, располагаются в следующем порядке по степени воздействия: ГТК, сумма атмосферных осадков за гидрологический год, сумма атмосферных осадков за календарный год, температура воздуха за календарный год (табл. 7).

Очевидно, что основным лимитирующим фактором при формировании годичного прироста сосны обыкновенной оказались суммы атмосферных осадков, однако тепловой режим также вносит весомый вклад в формирование прироста, особенно в последние десятилетия [40, 41].

Соответственно ГТК как показатель характеризующий суммарное влияние атмосферных осадков и температур воздуха и показал наибольшую силу влияния.

Так как значения критерия Фишера для всех рассмотренных факторов больше стандартного значения ($F_f(32,3) > F_{st}(3,9)$), можно сделать вывод о значимом влиянии климатических факторов (ГТК, атмосферных осадков, температуры воздуха) на прирост сосны обыкновенной.

Наиболее сильное влияние на прирост, до 81%, проявилось для поздней древесины с комплексным показателем увлажнения – ГТК Селянинова. Также очень высока сила влияния атмосферных осадков за гидрологический год, по поздней древесине она достигает 75 %.

Таблица 6

Коэффициенты корреляции между относительными индексами радиального прироста сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) и климатическими показателями (все значимые), а также солнечной активностью (не значимые)

Table 6

Correlation coefficients between radial increment relative indices of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) and climatic indicators (all significant), as well as solar activity (not significant)

Вид древесины type of wood	Климатические показатели Climate indicators				Солнечная активность Solar activity
	ГТК	P ₄₋₁₀	P ₄₋₉	P _{год}	W
Общая ш.г.к.* General TRW	0,52	0,33	0,37	0,33	0,13
Ранняя Early	0,55	0,35	0,40	0,34	0,12
Поздняя Late	0,54	0,33	0,36	0,32	0,11

Примечание: *Общая ш.г.к. – общая ширина годичного кольца, ГТК – гидротермический коэффициент; P₄₋₁₀ – сумма атмосферных осадков за апрель-октябрь, мм; P₄₋₉ – сумма атмосферных осадков за апрель-сентябрь, мм; P_{год} – сумма атмосферных осадков за год, мм; W – солнечная активность | Note: General TRW – total width of the growth ring, ГТК – hydrothermal coefficient; P₄₋₁₀ – amount of precipitation for April-October, mm; P₄₋₉ – amount of precipitation for April-September, mm; P_{year} – the amount of atmospheric precipitation for the year, mm; W – solar activity

Источник: собственные измерения и вычисления автора

Source: author's own measurements and calculations

Таблица 7

Значения силы влияния климатических факторов на прирост сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.)

Table 7

Values of the influence of climatic factors on the growth of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.)

Вид древесины type of wood	Климатические факторы Climatic factors			
	ГТК	t	P _{год}	P _{за гидрол. год}
Общая ш.г.к.* General TRW	0,79	0,36	0,70	0,73
Ранняя Early	0,74	0,32	0,67	0,69
Поздняя Late	0,81	0,40	0,72	0,75

Примечание: *Общая ш.г.к. – общая ширина годичного кольца, ГТК – гидротермический коэффициент; P_{за гидрол. год} – атмосферные осадки за гидрологический год, мм; t – температура воздуха, °C; P_{год} – сумма атмосферных осадков за год, мм | Note: General TRW – total width of the growth ring, ГТК – hydrothermal coefficient; P_{for hydrol. year} – atmospheric precipitation for the hydrological year, mm; t – air temperature, °C; P_{year} – the amount of atmospheric precipitation for the year, mm

Источник: собственные измерения и вычисления автора

Source: author's own measurements and calculations

Основой депонирования углерода в древесном стволе является процесс фотосинтеза и интенсивность формирования древесины (продуктивность древостоя). Рассчитав погодичный объёмный прирост древесины, мы можем установить среднее количество депонированного углерода средним

деревом в среднем за 10-летний период. На основании данных о среднем радиальном годичном приросте, в соответствии с выше приведенной методикой, получен средний объёмный прирост одного дерева (табл. 8).

Погодичное депонирование углерода одним средним деревом сосны обыкновенной (*P. sylvestris* L.)

Table 8

Annual carbon sequestration of one average Scots pine (*P. sylvestris* L.) tree

Календарный год Calendar year	2022	2021	2020	2019	2018	2017	2016	2015	2014	2013
Прирост, см ³ increment, sm ³	107,23	80,28	53,45	53,39	79,98	79,85	53,17	53,11	53,05	26,51
Сухое вещество, г Dry matter, g	42,89	32,11	21,38	21,36	31,99	31,94	21,27	21,25	21,22	10,61
Углерод, г Carbon, g	21,45	16,06	10,69	10,68	16,0	15,97	10,64	10,62	10,61	5,3

Источник: собственные измерения и вычисления автора

Source: author's own measurements and calculations

Как показали наши расчеты, одно среднее дерево обследованного 150-летнего древостоя в среднем за последние 10 лет (2013-2022 гг.) депонировало 12,8 г. углерода, с колебаниями от 5,3 г. (2013 г.) до 21,45 г. (2022 г.) (рис. 10).

Следует отметить, что с 2010 по 2013 год ширина годичных колец обследованного древостоя была аномально узкой в следствие чрезвычайной засухи 2010 года. Засушливыми были также 2014-2015 и 2020 годы.

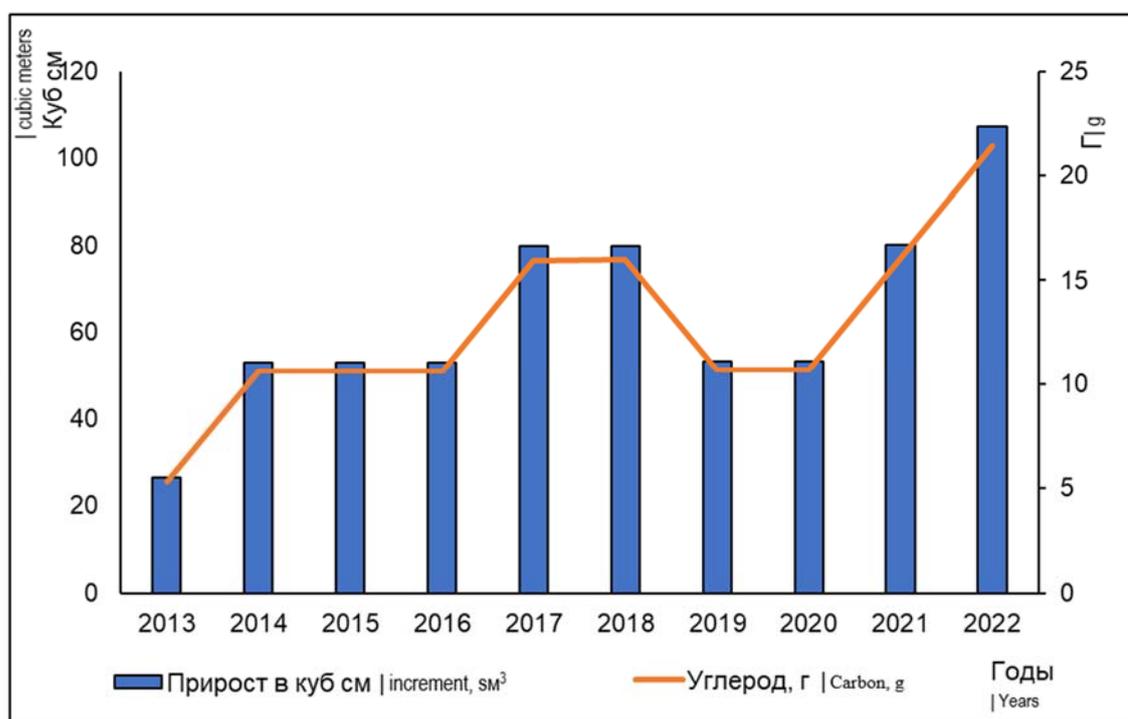


Рисунок 10. Погодичное депонирование углерода одним средним деревом сосны обыкновенной (*P. sylvestris* L.)

Figure 10. Annual carbon sequestration of one average Scots pine (*P. sylvestris* L.) tree

Источник: собственная композиция автора

Source: author's own composition

Выводы

1. В динамике колебаний общей ширины годовичных колец и ранней древесины (в абсолютных величинах) проявляются длительные циклы (82; 55 лет), цикл Брикнера (32; 41 год), также хорошо выражен цикл Швабе-Вольфа (10,5 лет). В динамике колебаний поздней древесины превалирует 10-11-летняя цикличность.

2. Кросс-спектральный анализ общей ширины годовичных колец и солнечной активности показал наиболее значимые совпадения частот колебаний в следующем порядке: 40; 10,5; 54; 11; 32. При анализе спектральной плотности совмещённых рядов ГТК и индексов прироста по общей и ранней древесине наиболее выражены 30-38-ми летние колебания, а также 24-летний цикл (магнитный или Хейла). Кросс-спектральный анализ сумм атмосферных осадков и индексов прироста по всем видам древесины выявил превалирование 40- и 32-х летних циклических составляющих (цикл Брикнера).

3. За май-август чётко выражена для ранней древесины положительная корреляционная связь с осадками (до 0,42 в мае) и отрицательная связь с температурой (до -0,3 также в мае). Выявлена положительная связь для всех видов древесины с температурой с декабря по апрель. В октябре – ноябре предыдущего года, также для всех видов древесины, наблюдается отрицательная связь с осад-

ками. Для формирования ранней древесины осадки марта являются значимыми ($0,19 > 0,16$), а для формирования поздней древесины – осадки апреля ($0,22 > 0,16$).

4. Корреляционный анализ связи ГТК Селянинова с индексами радиального прироста по видам древесины показал, что связь с ГТК значительно выше, чем с осадками и температурой по отдельности для всех видов древесины. Значения коэффициента корреляции (r) составили для общей древесины: 0,52; ранней: 0,55; поздней: 0,54. Связь положительная, значительная.

5. По степени влияния на формирование годовичного прироста сосны обыкновенной (*P. sylvestris* L.) основным лимитирующим фактором оказались суммы атмосферных осадков (73% по общей древесине, 75% по поздней). Однако тепловой режим также вносит весомый вклад в формирование прироста, особенно в последние десятилетия. ГТК, как показатель характеризующий суммарное влияние атмосферных осадков и температур воздуха, показал наибольшую силу влияния (до 81% для поздней древесины).

6. Выявлено, что одно среднее дерево обследованного 150-летнего древостоя в среднем за последние 10 лет (2013-2022 гг.) депонировало 12,8 г. углерода, с колебаниями от 5,3 г. (2013 г.) до 21,45 г. (2022 г.)

Список литературы

1. Kätzel R. Möglichkeiten und Grenzen der Anpassung an Klimaextreme – eine Betrachtung zu baumartenspezifischen Risiken aus Sicht der Öko-physiologie. Eberswalder Forstliche Schriftenreihe. 2009, 42, P. 22–34. DOI:10.5281/zenodo.30742.
2. Константинов А.В. Методический подход к оценке адаптационного потенциала лесных экосистем Российской Федерации /А.В. Константинов, С.М. Матвеев // Труды Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства. – 2020. – № 2. – С. 14–33. ISBN 2542–1468. Режим доступа: <https://journal.spb-niilh.ru/pdf/2-2020/spbniih-proceedings-2-2020-2-full.pdf>
3. Хантемиров Р.М. Изменения климата и формирование возрастных поколений лиственницы на полярной границе леса на Ямале / Р.М. Хантемиров, А. Ю. Сурков, Л. А. Горланова // ЭКОЛОГИЯ. 2008, № 5, С. 323-328. ISBN 0367-0597. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=jrfuan>
4. Арефьев С.П. Фиксация потепления климата в древесно-кольцевых хронологиях кустарников на севере Ямала и Гыданского полуострова / С.П. Арефьев // Журнал СФУ. Биология. 2015, Т. 8, № 4, С. 377-393. ISBN 1997-1389. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25360378>

5. Вахнина И.Л. Анализ динамики ширины годичных колец сосны обыкновенной в условиях Восточного Забайкалья / И.Л. Вахнина // Известия Иркутского го. Ун-та, Серия «Биология, Экология». 2011, Т.4, № 3, С. 13-17. ISBN 2073-3372. Режим доступа: <https://izvestiabiio.isu.ru/ru/article?id=23>
6. Костякова Т.В. Климатический сигнал в древесно-кольцевых хронологиях сосны обыкновенной *Pinus sylvestris* L. лесостепной зоны Республики Хакасия / Т.В. Костякова, Л.В. Белокопытова, О.В. Абраменко // Журнал Сибирского федерального университета. Биология. 2014, Т. 3, № 4, С. 22-25. ISBN 20730071. Режим доступа: <https://research.sfu-kras.ru/publications/publication/393847602-814196316>
7. Бочаров А.Ю. Структура лесов и климатический отклик деревьев в зоне контакта «лес-степь» (Горный Алтай) / А.Ю. Бочаров, Д.А. Савчук // Журнал СФУ. Биология. 2015, 8 (4), С. 426-440. ISBN 1998-8591. Режим доступа: <https://core.ac.uk/download/pdf/38647196.pdf>
8. Рыгалова Н.В., Быков Н.И. Пространственно-временная изменчивость климатического сигнала древесно-кольцевых хронологий ленточных и Приобских боров / Н.В. Рыгалова, Н.И. Быков // Журнал Сибирского федерального университета. Биология. 2015, Т. 8, № 4, С. 394-409.
9. Fritts H. *Tree Rings and Climate*. London, NY, San Francisco: Academic Press. 1976, 576 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-268450-0.X5001-0>
10. Мацковский В.В. *Климатический сигнал* в ширине годичных колец хвойных деревьев на севере и в центре Европейской территории России / В.В. Мацковский // М.: ГЕОС, 2013. – 148 с. ISBN 8-978-5-89118-615-6. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25505790>
11. Засухи Восточно-Европейской равнины по гидрометеорологическим и дендрохронологическим данным / О. Н. Соломина, И. С. Бушуева, Е. А. Долгова и др. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербург, 2017. – 360 с. ISBN 978-5-4469-1126-4. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30466268>
12. Костин С.И. Цикличность колебания увлажненности местности по годичным приростам деревьев в зависимости от солнечной активности / С.И. Костин // Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. 1975, № 354, С. 70-75.
13. Шиятов С.Г., Мазепа В.С. Цикличность радиального прироста деревьев в высокогорьях Урала / С.Г. Шиятов, В.С. Мазепа // В сборнике: Дендрохронология и дендроклиматология. Лимнологический институт (Академия наук СССР). Новосибирск. 1986, С. 134-160. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=28889687>
14. Матвеев С.М. Цикличность в динамике радиального прироста естественных и искусственных сосновых древостоев в борах Центральной лесостепи / С.М. Матвеев // Вестн. МГУЛ–Лесн. вестн. 2014, № 5(18), С. 110–116. ISBN 1727-3749 Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=sweoct>
15. Matveev S., Milenin A., Timashchuk D. The Effects of Limiting Climate Factors on the Increment of Native Tree Species (*Pinus sylvestris* L., *Quercus robur* L.) of the Voronezh Region. *Journal of Forest Science*. 2018, vol. 64, no. 10, pp. 427-434. DOI: 10.17221/36/2018-jfs
16. Каплина Н.Ф. Составляющие динамики прироста ранней и поздней древесины ствола дуба черешчатого в нагорной дубраве южной лесостепи / Н.Ф. Каплина // «Известия вузов. Лесной журнал». 2020, № 5 (377), С. 51-63. ISBN 0536-1036 Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44185626>
17. Таксационное описание (Планшет №6) Левобережного участкового лесничества Пригородного лесничества, Воронеж: Филиал ФГУП «Рослесинфорг» «Воронежлеспроект», 2012. – 452 с.
18. Погода и климат. Климат Воронежа. 2023. – URL: <http://www.pogodaiklimat.ru/monitor.php?id=34123>. Дата обращения: 20.10.2023.
19. Таранков В. И. Лесная климатология / В. И. Таранков ; под ред. В. И. Таранкова. – Воронеж : Воронежский государственный технический университет, 1991. – 82 с. – ISBN 5-230-03898-5. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21518506>
20. Sunspot Index and Long-term Solar Observations (2023) <https://www.sidc.be/silso/>.

21. Мироненко А.В., Матвеев С.М., Литовченко Д.А. Программа для обработки временных рядов методами скользящего среднего и математического моделирования // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2023615502, 15.03.2023. Заявка № 2023614622 от 15.03.2023. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50428361>
22. Методы дендрохронологии : учеб.-метод. пособие / С. Г. Шиятов, Е. А. Ваганов, А. В. Кирдянов [и др.] ; отв. ред.: Е. А. Ваганов, С. Г. Шиятов; Рос. акад. наук. Сиб. отд-ние. Ин-т леса им. В. Н. Сукачёва [и др.]. - Красноярск : Издат. центр Краснояр. гос. ун-та, 2000. – 80 с. – ISBN 5-7638-0295-0. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=18801379>
23. Шевелина И.В. Статистическая обработка лесоводственно-таксационной информации в среде STATISTICA / И.В. Шевелина, Д.Н. Нуриев // Екатеринбург: УГЛТУ, 2022. – 112 с. ISBN 978-5-94984-840-1. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49911777>.
24. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта с основами статистической обработки: учеб. / Б.А. Доспехов. – М.: «Колос», 2011. – 547 с. – ISBN – 978-5-458-23540-2.
25. Rinn F. TSAP. Version 3.0. Reference manual. Computer program for time series analysis and presentation. Heidelberg, 1996, 262 p.
26. Дендрэкология (методика древесно-кольцевого анализа). Учебно-методическое пособие. / Д.В. Тишин. – Казань : Казан. ун-т, 2015. – 36 с. – URL: https://dspace.kpfu.ru/xmlui/bitstream/handle/net/21965/02_82_000873.pdf.
27. Феклистов П. А. Биологические и экологические особенности роста сосны в северной подзоне Европейской тайги / П. А. Феклистов, В. Н. Евдокимов, В. М. Барзут // Архангельск: ИПЦ АГТУ, 1997. – 140 с. – ISBN 5-230-00061-9.
28. Ловелиус Н. В. 179-летний солнечный цикл в биосфере по данным дендроиндикации / Н. В. Ловелиус, А. Ю. Ретеюм // XIII международная Крымская конференция "Космос и биосфера" : Конференция посвящена 50-летию Крымской школы электромагнитной биологии, Симферополь, 23–27 сентября 2019 года. – Симферополь: Общество с ограниченной ответственностью «Издательство Типография «Ариал». - 2019. – С. 75-77. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=40445264>
29. Ретеюм А.Ю. Дендрохронология больших циклов солнечной системы / А.Ю. Ретеюм // Вестник Московского государственного университета леса - Лесной вестник. – 2014. – Т. 18. № 5. – С. 125-133. ISSN: 1727-3749. Режим доступа: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_22399811_19648415.pdf
30. Олейник М. Д. Выделение климатических циклов на территории Ачинско-Боготольской лесостепи на основе данных о радиальном приросте деревьев / М. Д. Олейник // Наука молодых 2022 : Сборник статей II Международного научно-исследовательского конкурса, Петрозаводск, 12 октября 2022 года. – Петрозаводск: Международный центр научного партнерства «Новая Наука» (ИП Ивановская И.И.). - 2022. – С. 450-460. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49536145>
31. Kang S, Liu J, Wang J. Hydroclimate Variations across North-Central China during the Past 530 Years and Their Relationships with Atmospheric Oscillations. *Forests*. 2023, 14(3). P. 640. DOI: <https://doi.org/10.3390/f14030640>
32. Pang W., Li Q., Liu Y., Song H., Sun C., Wang J., Yan Y., Cai Q., Ren M. Precipitation Variations in China's Altay Mountains Detected from Tree Rings Dating Back to AD 1615. *Forests* 2023, 14, P. 1496. DOI: <https://doi.org/10.3390/f14071496>
33. Zhang T., Yuan Y., Chen F., Yu S., Zhang R., Qin L., Jiang S. Reconstruction of hydrological changes based on tree-ring data of the Haba River, northwestern China. *J Arid Land*. 2018, 10, P. 53-67. DOI:10.1007/s40333-017-0034-2

34. Zhang R.B., Song H. M., Yuan Y. J., Wei W. S., Zhang T. W., Chen F., Yu S., Fan Z., Qin L. Summer precipitation variation in the southern slope of the Altay Mountains recorded by tree-ring $\delta^{13}C$. *Journal of Desert Research* 2015, 35, P. 106-112.
35. Jiang S.X., Yuan Y.J., Chen F., Shang H., Zhang T., Yu S., Qin L., Zhang R. A 291 year precipitation reconstruction in the upper Irtysh River basin based on tree-ring width. *Acta Ecologica Sinica*. 2016, 36, P. 2866-2875. DOI:10.5846/stxb201410202060
36. Shang H.M., Wei W.S., Yuan Y.J., Yu S.L., Zhang T.W., Zhang R.B. Early summer temperature history in northeastern Kazakhstan during the last 310 years recorded by tree rings. *MT SCI-ENGL* 2011, 29, P. 402-408. DOI:10.14214/sf.1155
37. Густокашина Н. Н. Тенденции изменения засушливости в степи и лесостепи Предбайкалья / Н. Н. Густокашина, Е. В. Максютова // География и природные ресурсы. – 2006. – № 4. – С. 76-81. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=9311065>
38. Страшная А. И. Агрометеорологические особенности засухи 2010 года в России по сравнению с засухами прошлых лет / А.И. Страшная, Т.А. Максименкова, О.В. Чуб // Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. – 2011. – № 345. – С. 171-188. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=16555543>
39. Данчева А.В. Влияние климатических факторов на радиальный прирост сосны в ленточных борах Прииртышья / А. В. Данчева, С. В. Залесов, Б. М. Муканов // Лесной вестник. *Forestry Bulletin*. – 2020. – Т. 24, № 2. – С. 5-10. DOI: 10.18698/2542-1468-2020-2-5-10.
40. Kang S, Liu J, Wang J. Hydroclimate Variations across North-Central China during the Past 530 Years and Their Relationships with Atmospheric Oscillations. *Forests*. 2023, 14(3), P. 640. DOI:10.3390/f14030640
41. Миленин А.И. Влияние метеофакторов на радиальный прирост культур дуба черешчатого в Правобережном лесничестве УОЛ ВГЛТУ имени Г.Ф. Морозова / А.И. Миленин // Лесотехнический журнал. – 2017. - № 3 (27). – Т. 7. – С. 129-135. DOI: 10.12737/article_59c22665a8ff90.84531444

References

1. Kätzel R. Möglichkeiten und Grenzen der Anpassung an Klimaextreme – eine Betrachtung zu baumartenspezifischen Risiken aus Sicht der Öko-physiologie. *Eberswalder Forstliche Schriftenreihe*. 2009. – 42. – P. 22–34. DOI:10.5281/zenodo.30742
2. Konstantinov A.V. Metodicheskij podhod k ocenke adaptacionnogo potenciala lesnyh ekosistem Rossijskoj Federacii / A.V. Konstantinov, S.M. Matveev // Trudy Sankt-Peterburgskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta lesnogo hozjajstva. – 2020. – № 2. – S. 14–33. ISBN 2542–1468. Rezhim dostupa: <https://journal.spbniilh.ru/pdf/2-2020/spbniilh-proceedings-2-2020-2-full.pdf>
3. Hantemirov R.M. Izmeneniya klimata i formirovanie vozrastnyh pokolenij listvennicy na po-lyarnoj granice lesa na Yamale / R.M. Hantemirov, A. Yu. Surkov, L. A. Gorlanova // *EKOLOGIYA*. 2008. – № 5. – S. 323-328. ISBN 0367-0597. Rezhim dostupa: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=jrfuan>
4. Arefev S.P. Fiksaciya potepneniya klimata v drevesno-kol'cevyyh hronologiyah kustarnikov na se-vere Yamala i Gydanskogo poluostrova / S.P. Arefev // *Zhurnal SFU. Biologiya*. 2015. – Т. 8. – № 4. – S. 377-393. ISBN 1997-1389. Rezhim dostupa: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25360378>
5. Vahnina I.L. Analiz dinamiki shiriny godichnyh kolec sosny obyknovennoj v usloviyah Vostochnogo Zabajkalya / I.L. Vahnina // *Izvestiya Irkutskogo go. Un-ta, Seriya «Biologiya, Ekologiya»*. 2011. – Т.4. – № 3. – S. 13-17. ISBN 2073-3372. Rezhim dostupa: <https://izvestiabiio.isu.ru/ru/article?id=23>
6. Kostyakova T.V. Klimaticheskij signal v drevesno-kol'cevyyh hronologiyah sosny obyknovennoj Pinus sylvestris L. lesostepnoj zony Respubliki Hakasiya / T.V. Kostyakova, L.V. Belokopytova, O.V. Abramenko // *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Biologiya*. 2014. – Т. 3. – № 4. – S. 22-25. ISBN 20730071. Rezhim dostupa: <https://research.sfu-kras.ru/publications/publication/393847602-814196316>

7. Bocharov A.Yu. Struktura lesov i klimaticheskij otklik derev'ev v zone kontakta «les-step» (Gor-nyj Altaj) / A.Yu. Bocharov, D.A. Savchuk // Zhurnal SFU. Biologiya. 2015. – 8 (4). – S. 426-440. ISBN 1998-8591. Rezhim dostupa: <https://core.ac.uk/download/pdf/38647196.pdf>
8. Rygalova N.V., Bykov N.I. Prostranstvenno-vremennaya izmenchivost' klimaticheskogo signala dre-vesno-kol'cevyyh hronologiy lentochnyh i Priobskih borov / N.V. Rygalova, N.I. Bykov // Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Biologiya. 2015. – T. 8. – № 4. – S. 394-409.
9. Fritts H. Tree Rings and Climate. London, NY, San Francisco: Academic Press. 1976. – 576 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-268450-0.X5001-0>
10. Mackovskij V.V. Klimaticheskij signal v shirine godichnyh kolec hvojnyyh derev'ev na severe i v centre Evropejskoj territorii Rossii / V.V. Mackovskij // M.: GEOS, 2013. – 148 s. ISBN 8-978-5-89118-615-6. Rezhim dostupa: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25505790>
11. Zasuhi Vostochno-Evropejskoj ravniny po gidrometeorologicheskim i dendrohronologicheskim dannym / O. N. Solomina, I. S. Bushueva, E. A. Dolgova i dr. – Sankt-Peterburg: Sankt-Peterburg, 2017. – 360 s. ISBN 978-5-4469-1126-4. Rezhim dostupa: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30466268>
12. Kostin S.I. Ciklichnost' kolebaniya uvlazhnennosti mestnosti po godichnym priroстам derev'ev v zavisimosti ot solnechnoj aktivnosti / S.I. Kostin // Trudy Glavnoj geofizicheskoy observatorii im. A.I. Voejkova. 1975. – № 354. – S. 70-75.
13. Shiyatov S.G., Mazepa V.S. Ciklichnost' radial'nogo prirosta derev'ev v vysokogor'yah Urala / S.G. Shiyatov, V.S. Mazepa // V sbornike: Dendrohronologiya i dendroklimatologiya. Limnologicheskij institut (Akademiya nauk SSSR). Novosibirsk. 1986. – S. 134-160. Rezhim dostupa: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=28889687>
14. Matveev S.M. Ciklichnost' v dinamike radial'nogo prirosta estestvennyh i iskusstvennyh sos-novyh drevostoev v borah Central'noj lesostepi / S.M. Matveev // Vestn. MGUL–Lesn. vestn. 2014. – № 5(18). – S. 110–116. ISBN 1727-3749 Rezhim dostupa: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=sweoct>
15. Matveev S., Milenin A., Timashchuk D. The Effects of Limiting Climate Factors on the Increment of Native Tree Species (*Pinus sylvestris* L., *Quercus robur* L.) of the Voronezh Region. Journal of Forest Science. 2018. – vol. 64. – no. 10, pp. 427-434. DOI: 10.17221/36/2018-jfs
16. Kaplina N.F. Sostavlyayushchie dinamiki prirosta rannej i pozdnej drevesiny stvola duba chereschatogo v nagornoj dubrave yuzhnoj lesostepi / N.F. Kaplina // «Izvestiya vuzov. Lesnoj zhurnal». 2020. – № 5 (377). – S. 51-63. ISBN 0536-1036 Rezhim dostupa: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44185626>
17. Taksacionnoe opisanie (Planshet №6) Levoberezhnogo uchastkovogo lesnichestva Prigorodnogo lesnichestva, Voronezh: Filial FGUP «Roslesinforg» «Voronezhlesproekt», 2012. – 452 p.
18. Pogoda i klimat. Klimat Voronezha [Elektronnyj resurs], 2023 / <http://www.pogodaiklimat.ru/monitor.php?id=34123>. Data obrashcheniya: 20.10.2023.
19. Tarankov V. I. Lesnaya klimatologiya / V. I. Tarankov ; Pod redakciei V. I. Tarankova. – Voronej : Voronejskii gosudarstvennii tehniceskii universitet, 1991. – 82 s. – ISBN 5-230-03898-5. Rezhim dostupa: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21518506>
20. Sunspot Index and Long-term Solar Observations (2023) <https://www.sidc.be/silso/>
21. Mironenko A.V., Matveev S.M., Litovchenko D.A. Programma dlya obrabotki vremennyh rya_dov metodami skolzyaschego srednego i matematicheskogo modelirovaniya // Svidetelstvo o gosudarstvennoi registracii programma dlya EVM 2023615502, 15.03.2023. Zayavka № 2023614622 ot 15.03.2023. Rezhim dostupa: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50428361>
22. Shiyatov S.G. Metodi dendrohronologii : Ucheb.-metod. posobie / S. G. Shiyatov, E. A. Vaganov, A. V. Kiryanov [i dr.]; Otv. red.: E. A. Vaganov, S. G. Shiyatov; Ros. akad. nauk. Sib. otd_nie. In_t lesa im. V. N. Sukacheva [i dr.]. - Krasnoyarsk : Izdat. centr Krasnoyar. gos. un_ta, 2000. – 80 s.. – ISBN 5-7638-0295-0. Rezhim dostupa: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=18801379>

23. Shevelina I.V., Nureyev D.N. Statisticheskaya obrabotka lesovodstvenno-taksatsionnoy informatsii v srede STATIS-TICA [Statistical processing of forestry and taxation information in the STATISTICA environment]. Yekaterinburg: UGLTU, 2022. - 112 p. ISBN 978-5-94984-840-1. Rezhim dostupa: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49911777>
24. Dospheov B.A. Metodika polevogo opita s osnovami statisticheskoi obrabotki_ ucheb. / B.A. Dospheov // M. «Kolos». 2011. – 547 p. – ISBN – 978-5-458-23540-2.
25. Rinn F. TSAP. Version 3.0. Reference manual. Computer program for time series analysis and presentation // Heidelberg. 1996. 262.
26. Dendroekologiya (metodika drevesno-kol'cevogo analiza). Uchebno-metodicheskoe posobie. / D.V. Tishin. – Kazan': Kazan. un-t, 2015. – 36 s. Rezhim dostupa: https://dspace.kpfu.ru/xmlui/bitstream/handle/net/21965/02_82_000873.pdf
27. Feklistov P.A. Biologicheskie i ekologicheskie osobennosti rosta sosny v severnoj podzone Evropejskoj tajgi / P.A. Feklistov, V.N. Evdokimov, V.M. Barzut // Arhangelsk: IPC AGTU, 1997. – 140 s. – ISBN: 5-230-00061-9.
28. Lovelius N. V. 179-letnii solnechnii cikl v biosfere po dannim dendroindikacii / N. V. Lovelius, A. Yu. Reteyum // XIII mejdunarodnaya Krimskaya konferenciya "Kosmos i biosfera" : Konferenciya posvyaschena 50 letiyu Krimskoi shkole elektromagnitnoi biologii, Simferopol, 23–27 sentyabrya 2019 goda. – Simferop: Obschestvo s ogranichennoi otvetstvennostyu «Izdatelstvo Tipografiya «Arial». - 2019. – S. 75-77. Rezhim dostupa: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=40445264>
29. Reteyum A.Yu. Dendrohronologiya bol'shih ciklov solnechnoj sistemy / A.Yu. Reteyum // Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa - Lesnoj vestnik. – 2014. – T. 18. № 5. – S. 125-133. ISSN: 1727-3749. Rezhim dostupa: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_22399811_19648415.pdf
30. Oleinik M. D. Videlenie klimaticeskikh ciklov na territorii Achinsko-Bogotolskoi lesostepi na osnove dannih o radialnom priroste derevev / M. D. Oleinik // Nauka molodih 2022 : Sbornik statei II Mejdunarodnogo nauchno_issledovatel'skogo konkursa, Petrozavodsk, 12 oktyabrya 2022 goda. – Petrozavo: Mejdunarodnii centr nauchnogo partnerstva «Novaya Nauka» (IP Ivanovskaya I.I.). - 2022. – S. 450-460. Rezhim dostupa: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49536145>
31. Kang S., Liu J., Wang J. Hydroclimate Variations across North-Central China during the Past 530 Years and Their Relationships with Atmospheric Oscillations. *Forests*. 2023 - 14(3) P. 640. DOI: <https://doi.org/10.3390/f14030640>
32. Pang W., Li Q., Liu Y., Song H., Sun C., Wang J., Yan Y., Cai Q., Ren M. Precipitation Variations in China's Altay Mountains Detected from Tree Rings Dating Back to AD 1615. *Forests* 2023, 14, P. 1496. DOI: <https://doi.org/10.3390/f14071496>
33. Zhang T., Yuan Y., Chen F., Yu S., Zhang R., Qin L., Jiang S. Reconstruction of hydrological changes based on tree-ring data of the Haba River, northwestern China. *J Arid Land*. 2018, 10, P. 53-67. DOI:10.1007/s40333-017-0034-2
34. Zhang R.B., Song H. M., Yuan Y. J., Wei W. S., Zhang T. W., Chen F., Yu S., Fan Z., Qin L. Summer precipitation variation in the southern slope of the Altay Mountains recorded by tree-ring $\delta^{13}C$. *Journal of Desert Research* 2015, 35, P. 106-112. DOI:
35. Jiang S.X., Yuan Y.J., Chen F., Shang H., Zhang T., Yu S., Qin L., Zhang R. A 291 year precipitation reconstruction in the upper Irtysh River basin based on tree-ring width. *Acta Ecologica Sinica*. 2016, 36, P. 2866-2875. DOI:10.5846/stxb201410202060
36. Shang H.M., Wei W.S., Yuan Y.J., Yu S.L., Zhang T.W., Zhang R.B. Early summer temperature history in northeastern Kazakhstan during the last 310 years recorded by tree rings. *MT SCI-ENGL* 2011, 29, P. 402-408. DOI:10.14214/sf.1155

37. Gustokashina N. N. Tendencii izmeneniya zasushlivosti v stepi i lesostepi Predbaikalya / N. N. Gustokashina, E. V. Maksyutova // Geografiya i prirodnie resursi. – 2006. – № 4. – S. 76-81. Rezhim dostupa: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=9311065>

38. Strashnaya A. I. Agrometeorologicheskie osobennosti zasuhi 2010 goda v Rossii po sravneniyu s zasuhami proshlih let / A.I. Strashnaya, T.A. Maksimenkova, O.V. Chub // Trudi Gidrometeorologicheskogo nauchno_issledovatel'skogo centra Rossiiskoi Federacii. – 2011. – № 345. – S. 171-188. Rezhim dostupa: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=16555543>

39. Dancheva A.V. Vliyanie klimaticheskikh faktorov na radialnii prirost sosni v lentochnih borah Priirtishya / A. V. Dancheva, S. V. Zalesov, B. M. Mukanov // Lesnoi vestnik. Forestry Bulletin. – 2020. – T. 24, № 2. – S. 5-10. DOI: 10.18698/2542-1468-2020-2-5-10

40. Kang S, Liu J, Wang J. Hydroclimate Variations across North-Central China during the Past 530 Years and Their Relationships with Atmospheric Oscillations. *Forests*. 2023, 14(3), P. 640. DOI:10.3390/f14030640

41. Milenin A.I. Vliyanie meteofaktorov na radialnii prirost kultur duba chereschatogo v Pravoberejnom lesnichestve UOL VGLTU imeni G.F. Morozova / Lesotekhnicheskii jurnal. – 2017. - № 3 (27). – T. 7. – S. 129-135. DOI: 10.12737/article_59c22665a8ff90.84531444

Сведения об авторах

✉ *Матвеев Сергей Михайлович* – доктор биологических наук, профессор, заведующий кафедрой лесоводства, лесной таксации и лесоустройства, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Российская Федерация; 394087, e-mail: lisovod@bk.ru

Литовченко Дарья Андреевна – кандидат биологических наук, доцент кафедры лесоводства, лесной таксации и лесоустройства, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Российская Федерация; 394087, e-mail: timashchuk90@mail.ru

✉ – Для контактов | Corresponding author

Information about the authors

✉ *Sergey M. Matveev* – Doct. Sci. (Biol.), Head of Department of Silviculture, Forest Taxation and Forest Management, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, e-mail: lisovod@bk.ru.

Daria A. Litovchenko – Cand. Sci. (Biol.), Associate Professor of the Department of Forestry, Forest Taxation and Forest Management, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, e-mail: timashchuk90@mail.ru.