

Научная статья
УДК 630*561.24
DOI: 10.37482/0536-1036-2024-3-46-64

Дендрэкологическое исследование роста осины в условиях Московской области

Д.Е. Румянцев[✉], *д-р биол. наук, проф.*; *ResearcherID: [AAJ-7093-2021](https://orcid.org/0000-0001-9871-9504)*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9871-9504>

Н.С. Воробьева, *аспирант*; *ResearcherID: [KDN-7096-2024](https://orcid.org/0009-0008-9911-0045)*,

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-9911-0045>

Мытищинский филиал Московского государственного технического университета им. Баумана, ул. 1-я Институтская, д. 1, г. Мытищи, Московская обл., Россия, 141005; dendro@mgul.ac.ru[✉], soln.natashenka@yandex.ru

Поступила в редакцию 26.09.22 / Одобрена после рецензирования 22.12.22 / Принята к печати 23.12.22

Аннотация. Согласно концепции В.А. Драгавцева, реакция годовичного кольца на провокационный экологический фон разных лет создает «портрет» адаптивных полигенных систем генотипа. Сопоставляя реакции основных лесообразующих пород из экологически однородного местообитания, возможно давать оценки уровню сходства их экологических свойств. Кластерный анализ древесно-кольцевых хронологий осины и произрастающих с ней видов, корреляционный анализ хронологий, индексированных хронологий и временных рядов метеофакторов, спектральный анализ Фурье были использованы для дендрэкологического исследования особенностей роста осины в условиях Молокчинского ботанико-энтомологического заказника Сергиево-Посадского района Московской области. Для сравнения с хронологиями осины из 2 древостоев были применены хронологии березы повислой, дуба черешчатого, ольхи серой и ели европейской. Установлено, что кластерный анализ индексированных хронологий на основе расчета квадрата евклидова расстояния и объединения хронологий в группы по правилу полного сцепления выделяет хронологии осины в отдельный кластер, сильно отстоящий от остальных рассматриваемых пород. По данным корреляционного анализа индексированных хронологий, динамика радиального прироста осины наиболее тесно связана с динамикой радиального прироста березы повислой и ольхи серой. При этом максимальный коэффициент корреляции (0,71) наблюдается для хронологий осины из 2 разных древостоев. Среди климатических факторов основное лимитирующее влияние на прирост осины оказывают осадки июля в год формирования годовичного кольца и осадки августа в год, предшествующий году формирования годовичного кольца. Реакция на осадки августа прошлого года специфична для древостоев осины и имеет несколько вариантов экофизиологической интерпретации. По данным спектрального анализа Фурье, хронологии осины имеют наиболее четко выраженную циклическую компоненту с периодом 10,4 года, что полностью совпадает с циклической компонентой временного ряда чисел Вольфа на рассматриваемом временном интервале. Это выделяет осину среди остальных исследованных лесообразующих пород. Сделано заключение о специфичности динамики радиального прироста осины по сравнению с другими лесообразующими породами.

Ключевые слова: дендрохронологическая информация, дендроклиматический анализ, кластерный анализ, анализ Фурье, осина, лесообразующие виды, Молокчинский ботанико-энтомологический заказник

Для цитирования: Румянцев Д.Е., Воробьева Н.С. Дендроэкологическое исследование роста осины в условиях Московской области // Изв. вузов. Лесн. журн. 2024. № 3. С. 46–64. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-3-46-64>

Original article

Dendroecological Research into Aspen Growth in the Conditions of the Moscow Region

Denis E. Rumyantsev[✉], Doctor of Biology, Prof.; ResearcherID: [AAJ-7093-2021](https://orcid.org/0000-0001-9871-9504),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9871-9504>

Nataliya S. Vorob'yeva, Postgraduate Student; ResearcherID: [KDN-7096-2024](https://orcid.org/0009-0008-9911-0045),
ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-9911-0045>

Bauman Moscow State Technical University (Mytishchi Branch), ul. 1-ya Institutskaya, 1, Mytishchi, Moscow Region, 141005, Russian Federation; dendro@mgul.ac.ru[✉], soln.natashenka@yandex.ru

Received on September 26, 2022 / Approved after reviewing on December 22, 2022 / Accepted on December 23, 2022

Abstract. According to V.A. Dragavtsev's concept, the reaction of the annual ring to the provocative environmental background of different years creates a “portrait” of adaptive polygenic genotype systems. By comparing the reactions of the main forest-forming species from an ecologically homogeneous habitat, it is possible to assess the level of similarity of their ecological properties. Cluster analysis of tree-ring chronologies of aspen and species growing together with it, correlation analysis of chronologies and indexed chronologies, as well as time series of meteorological factors and Fourier spectral analysis have been used for a dendroecological research into aspen growth features in the conditions of the Molokchinskiy Botanical and Entomological Reserve of the Sergiev Posad District of the Moscow Region. To compare with the chronologies of aspen from two stands, the chronologies of European white birch, English oak, grey alder and Norway spruce have been used. It has been established that the cluster analysis of indexed chronologies based on calculating the squared Euclidean distance and combining the chronologies into groups according to the rule of complete linkage distinguishes aspen chronologies into a separate cluster, very distant from the other species under consideration. According to the correlation analysis of indexed chronologies, the dynamics of radial increment of aspen is most closely related to the dynamics of radial increment of European white birch and gray alder. Moreover, the maximum correlation coefficient (0.71) is observed for the chronologies of aspen from two different stands. Among the climatic factors, the main limiting influence on aspen increment is exerted by July precipitation in the year of the annual ring formation and August precipitation in the year preceding the year of the annual ring formation. The response to precipitation in August last year is specific to aspen stands and has several options for ecophysiological interpretation. According to Fourier spectral analysis, aspen chronologies have the most pronounced cyclic component with a period of 10.4 years,

which completely coincides with the cyclic component of the time series of Wolf numbers in the time interval under consideration. This distinguishes aspen from the rest of the studied forest-forming species. A conclusion has been made about the specificity of the dynamics of the radial growth of aspen in comparison with other forest-forming species under study.

Keywords: dendrochronological data, dendroclimatic analysis, cluster analysis, Fourier analysis, aspen, forest-forming species, Molokchinskiy Botanical and Entomological Reserve

For citation: Rumyantsev D.E., Vorob'yeva N.S. Dendroecological Research into Aspen Growth in the Conditions of the Moscow Region. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2024, no. 3, pp. 46–64. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-3-46-64>

Введение

В рамках концепции эколого-генетического контроля организации сложных полигенных количественных признаков растений, сформулированной В.А. Драгавцевым [1–6], утверждается, что спектр изменений индексов радиального прироста по годам характеризует наследственные экологические свойства генотипа. Подобного рода методический взгляд широко апробирован в наших предыдущих работах [12–14].

Целью данного исследования было выявление специфики формирования погодичной динамики радиального прироста осины как характеристики ее специфичных наследственных экологических свойств. Для достижения данной цели необходимо вести анализ динамики прироста осины в сопоставлении с приростом других автохтонных лесообразующих пород, произрастающих в унифицированных лесорастительных условиях.

Объекты и методы исследования

Объектом нашего исследования стал Государственный природный заказник областного значения «Молокчинский ботанико-энтомологический заказник». Он находится в Сергиево-Посадском районе Московской области.

В 2016–2018 гг. на территории заказника проводился отбор кернов древесины с основных лесообразующих пород. Временные пробные площади были заложены в пределах таксационного выдела (для одного вида) и не имели четких границ. В живом напочвенном покрове пробных площадей преобладала кислица обыкновенная, а также произрастал комплекс видов, типичных для кисличного типа леса. Подлесок был составлен рябиной обыкновенной, лещиной обыкновенной, бересклетом бородавчатым и жимолостью лесной. Подрост – преимущественно ель и осина, изредка встречались дуб черешчатый и клен остролистный.

Отбор образцов древесины производился с помощью бурава Пресслера на высоте 1,3 м с 15 случайным образом взятых учетных деревьев I–III классов Крафта, по 1 керну с каждого дерева. Таксационные показатели деревьев приведены в табл. 1.

Таблица 1

Средние характеристики 15 учетных деревьев
The average characteristics of 15 census trees

Вид*	Диаметр, см	Высота, м	Класс возраста
Ель европейская	46	29	VI
Дуб черешчатый	42	30	IV
Береза повислая	34	27	IX
Ольха серая	22	18	VII
Осина 1 (древостой с гнилью)	30	28	VII
Осина 2 (древостой без гнили)	28	23	VI

*Далее в таблицах и на рисунках – ель, дуб, береза, ольха, осина 1, осина 2.

Для измерения образцов древесины их поверхность специальным образом обрабатывалась: керн смачивался водой, зачищался лезвием бритвы и натирался порошком мела. Затем проводилось определение ширины годичных колец с помощью прибора «Линтаб» в полуавтоматическом режиме. Для контроля за правильностью измерений использовалась перекрестная датировка в программе TSAP-Win. После датировки файл сохранялся в формате, пригодном для работы в программе Microsoft Excel, при помощи которой выполнены основные расчеты.

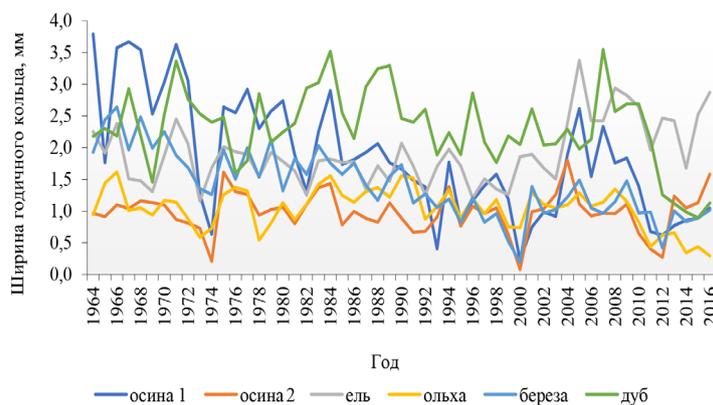
Кластерный анализ и анализ Фурье проведены в программе Statistica 13.0 [16]. Для дендроклиматического анализа были использованы данные метеостанции Москвы: <http://www.pogodaiklimat.ru/history/27612.htm>.

Результаты исследования и их обсуждение

Все полученные хронологии имели разную длину, общий временной интервал для них составил 1964–2016 гг. Хронологии по средней ширине годичного кольца отражает рис. 1.

Рис. 1. Динамика абсолютной ширины годичного кольца учетных деревьев на пробных площадях

Fig. 1. The dynamics of the absolute width of the annual ring of census trees in the sample plots



В виде, представленном на рис. 1, хронологии мало подходят для сопоставления и дают немного информации для анализа. Они явно отличаются по средней ширине годичного кольца, однако, учитывая фактор возрастного тренда и разную длину хронологий (разный возраст учетных деревьев), этот показатель малоинформативен. Обращает на себя внимание наличие 2 ярко выраженных лет

с формированием экстремально узких годовичных колец: 1974 и 2000 гг. Однако они прослеживаются не у всех видов и четко заметны только для ольхи, осины и березы. Вероятно, это эффект от воздействия листогрызущих вредителей.

Сходство хронологий на данном этапе возможно попытаться оценить методом корреляционного анализа (табл. 2).

Таблица 2

Коэффициенты корреляции между хронологиями по ширине годовичного кольца для 15 учетных деревьев
The correlation coefficients between chronologies by the annual ring width for 15 census trees

	Ель	Дуб	Береза	Ольха	Осина 1	Осина 2
Ель	1,00					
Дуб	-0,18	1,00				
Береза	-0,05	0,29	1,00			
Ольха	0	0,49	0,46	1,00		
Осина 1	0,11	0,36	0,77	0,42	1,00	
Осина 2	0,15	-0,04	0,38	0,30	0,38	1,00

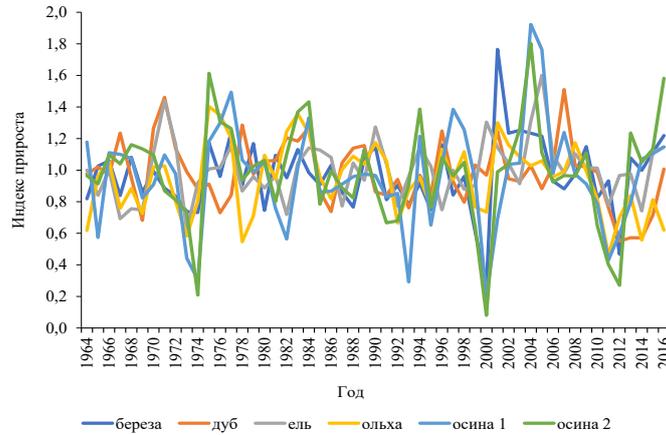
Полученные сведения не поддаются внятной интерпретации с точки зрения оценки сходства по наследственным экологическим свойствам. Наличие 2 хронологий по осине является четким инструментом контроля в наших выкладках: сходство между ними должно быть максимальным по сравнению со сходством хронологии осины с хронологией любого другого вида. Здесь этого не наблюдается, что биологически объяснимо, т. к. превалирующий вклад в коэффициент корреляции вносят долговременные тенденции изменчивости дерева (эндогенные и фитоценотически обусловленные). В целом используемый метод дает ценную информацию, полученные нами на данном этапе результаты сопоставимы по методологии с результатами работ авторского коллектива под руководством А.Н. Соболева [15]. К сожалению, отличия по спектрам изученных видов не позволяют провести более конкретных сравнений.

Выполнялась индексация рядов радиального прироста: ширина годовичного кольца каждого года делилась на среднюю ширину годовичного кольца за последние 5 лет. На основе индивидуальных индексированных хронологий рассчитывалась средняя индексированная хронология древостоя. Результаты расчетов отражают графики на рис. 2.

При анализе индексированных хронологий четко просматривается экстремально низкий радиальный прирост в 2000 г. в хронологиях осины и березы, а также осины в 1974 г. Таким образом, результаты совпадают с результатами анализа неиндексированных хронологий. Полученные данные имеет смысл связывать с объединением листогрызущими вредителями вследствие вспышки их массового размножения. В качестве вероятного вредителя в 2000 г. можно назвать непарного шелкопряда. В этом году все лиственные породы, кроме ели, демонстрировали пониженный прирост, что косвенно подтверждает предположение. В 1999–2000 гг. вспышка численности названного вредителя наблюдалась, например, в Мордовском заповеднике.

Рис. 2. Динамика индексов радиального прироста учетных деревьев

Fig. 2. The dynamics of radial increment indices in the census trees



Сравнение сходства видов по наследственным экологическим свойствам возможно провести методом корреляционного анализа индексированных хронологий (табл. 3).

Таблица 3

Коэффициенты корреляции между индексированными хронологиями 15 учетных деревьев

The correlation coefficients between the indexed chronologies of 15 census trees

	Ель	Дуб	Береза	Ольха	Осина 1	Осина 2
Ель	1,00					
Дуб	0,10	1,00				
Береза	0,18	0,12	1,00			
Ольха	0,31	0,28	0,44	1,00		
Осина 1	0,38	0,15	0,42	0,34	1,00	
Осина 2	0,14	0,13	0,65	0,46	0,71	1,00

Анализируя данные табл. 3, в первую очередь следует отметить, что хронологии осины демонстрируют между собой максимальное сходство, что является надежным маркером биологической интерпретируемости полученных коэффициентов. Достаточно высоко взаимное сходство в группе «осина, береза, ольха».

При кластерном анализе были использованы 2 метода расчета кладиограммы: расчет простого евклидова расстояния и объединение по правилу простого сцепления (вариант 1 – рис. 3); расчет квадрата евклидова расстояния и объединение по правилу сложного сцепления (вариант 2 – рис. 4).

Из рис. 3 видно, что данные по березе и ольхе серой оказываются близки, что можно объяснить как их систематическим статусом (семейство березовых), так и сходными лесоводственными свойствами. Дуб наименее похож на все остальные породы, что также ожидаемо. Однако в этой кладиограмме отсутствует выбранный нами за основу критерий – максимальное сходство (близость) хронологий осины.

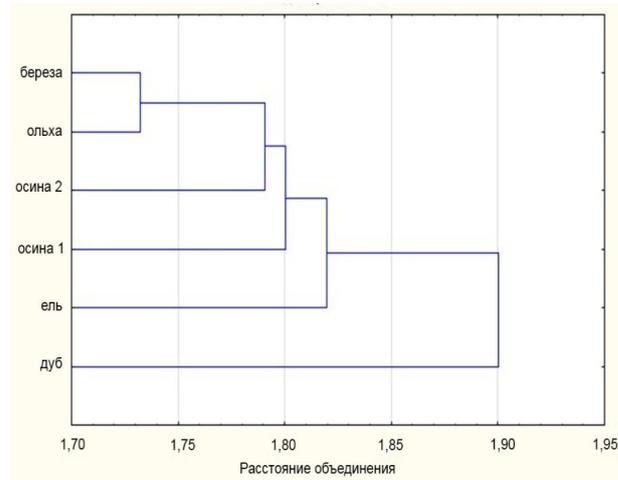


Рис. 3. Результаты кластерного анализа по варианту 1
Fig. 3. The results of cluster analysis for option 1

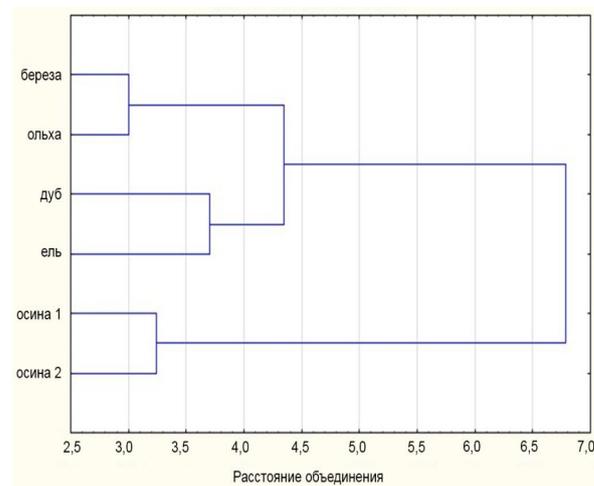


Рис. 4. Результаты кластерного анализа по варианту 2
Fig. 4. The results of cluster analysis for option 2

Результаты кластеризации по варианту 2 отвечают выбранному нами критерию: хронологии осины оказываются максимально близки между собой. Аналогичны по степени близости береза и ольха, а также дуб и ель. Характерно, что хронологии осины наиболее удалены от всех остальных пород: они образуют равнозначный кластер с группой «дуб, ель, ольха, береза». Это свидетельствует об уникальных наследственных экологических свойствах осины.

Таким образом, наша исходная предпосылка заключается в том, что ряды радиального прироста несут в себе генетическую компоненту. Оценивая их сходство, можно определить наследственные экологические свойства (адаптивных полигенных систем, в терминологии В.А. Драгавцева). Очевидно, что сходство рядов может быть оценено по-разному и такие оценки дадут разные результаты. В своем исследовании мы использовали хронологии по абсолютной ширине годичного кольца и индексированные хронологии, сходство между которыми выявляли методами корреляционного и кластерного анализа. Основным критерием, определяющим по тем ли компонентам ведется оценка сходства, было наличие максимальной связи между 2 хронологиями осины в сравнении с основной группой, включающей в себя ель, дуб, березу и ольху. Установлено, что корреляционный анализ индексированных хронологий

дает результаты, близкие к тому, как мы себе представляем оценку сходства по адаптивным полигенным системам. Хронологии березы, осины и ольхи демонстрируют значительный уровень сопряженности.

Кластерный анализ по варианту 2 выносит хронологии осины в отдельный уникальный кластер. Это согласуется с общими представлениями об уникальности данной древесной породы. В отличие от всех остальных, она размножается преимущественно вегетативно, что ведет к высокому единообразию генетического материала в ценопопуляции, кроме того, даже между взрослыми растениями сохраняется связь через корни и обмен пластическими веществами. В каком-то смысле древостой осины на локальном участке представляет собой локальный суперорганизм, что, видимо, позволяет ему специфически реагировать на смену погодных условий от вегетационного сезона к вегетационному сезону и обеспечивает особый характер временной изменчивости годичных колец, непохожий на характер изменчивости годичных колец у иных лесообразующих видов.

Для лучшего понимания специфики погодичной изменчивости осины необходимо выполнить дендроклиматический анализ [18, 24]. Для этого возможно провести корреляционный анализ между индексированными хронологиями и рядами метеопараметров (среднемесячная температура, °С; месячная сумма осадков, мм). Результаты расчетов представлены в табл. 4. При числе степеней свободы 65 и уровне доверительной вероятности 0,05 достоверны коэффициенты от 0,24 и выше.

Таблица 4

Коэффициенты корреляции между индексами прироста и метеопараметрами в год формирования годичного кольца и в год, предшествовавший этому процессу, для 15 учетных деревьев
The correlation coefficients between growth indices and meteorological parameters in the year of the annual ring formation and in the year preceding this process for 15 census trees

Месяц	Ель	Дуб	Береза	Ольха	Осина 1	Осина 2
<i>Год формирования годичного кольца:</i>						
<i>Индекс прироста и температура</i>						
Январь	0,23	-0,12	0,13	-0,06	0,25	0,07
Февраль	0,10	-0,18	0,19	0,03	0,26	0,21
Март	0,13	-0,05	0,15	0,15	0,13	0,08
Апрель	0,14	-0,18	0,13	-0,08	0,06	-0,05
Май	-0,09	-0,03	0,01	-0,14	-0,06	-0,10
Июнь	-0,11	-0,10	0,14	-0,05	-0,02	0,09
Июль	-0,26	-0,22	0,13	-0,27	-0,01	0,03
Август	-0,11	0,06	-0,12	-0,21	-0,03	-0,04
Сентябрь	-0,03	0,07	0,06	-0,15	0,24	0,20
Октябрь	-0,08	0,04	0,02	-0,09	0,02	0,04
Ноябрь	-0,03	-0,10	0,03	-0,13	-0,04	-0,08
Декабрь	0,05	-0,09	0,12	0,06	0,32	0,18

Окончание табл. 4

Месяц	Ель	Дуб	Береза	Ольха	Осина 1	Осина 2
<i>Индекс прироста и осадки</i>						
Январь	0,36	0,10	0,10	0,16	0,23	0,10
Февраль	0,15	0,07	0,15	-0,09	0,08	0,08
Март	0,07	-0,09	0,00	-0,03	0,11	0,15
Апрель	0,15	0,05	0,05	0,23	-0,05	-0,05
Май	0,15	-0,17	0,02	-0,06	0,02	0,08
Июнь	0,17	-0,09	-0,14	-0,12	-0,14	-0,23
Июль	0,25	0,02	0,10	0,15	0,27	0,25
Август	0,02	0,05	0,27	0,25	0,06	0,25
Сентябрь	-0,12	-0,13	-0,06	-0,08	-0,14	-0,07
Октябрь	0,02	0,08	-0,15	0,05	0,04	-0,06
Ноябрь	-0,04	0,06	-0,09	-0,10	0,02	0,01
Декабрь	0,00	-0,12	0,00	0,06	0,00	0,01
<i>Год, предшествовавший формированию годичного кольца:</i>						
<i>Индекс прироста и температура</i>						
Январь	0,14	-0,09	-0,04	-0,08	0,08	-0,03
Февраль	0,09	-0,16	0,21	-0,05	0,16	0,18
Март	0,35	-0,10	0,16	0,18	0,14	0,15
Апрель	-0,14	-0,09	-0,03	-0,16	-0,13	-0,04
Май	-0,09	-0,20	-0,21	-0,23	-0,23	-0,19
Июнь	-0,06	-0,17	-0,03	-0,03	0,11	0,06
Июль	0,02	-0,34	0,01	-0,04	0,09	0,05
Август	0,07	-0,03	0,11	0,01	0,00	0,02
Сентябрь	0,16	0,10	-0,14	-0,16	0,01	-0,19
Октябрь	0,22	0,10	-0,05	-0,05	0,00	-0,11
Ноябрь	-0,06	-0,10	-0,15	-0,16	-0,10	-0,12
Декабрь	-0,04	0,00	-0,05	-0,08	0,21	0,03
<i>Индекс прироста и осадки</i>						
Январь	0,14	-0,02	0,15	0,06	0,04	0,03
Февраль	-0,12	-0,06	0,09	-0,05	-0,11	0,04
Март	-0,09	0,12	-0,03	-0,06	0,00	0,10
Апрель	0,07	0,11	0,09	-0,01	0,08	-0,01
Май	-0,14	0,06	0,06	-0,12	0,03	0,07
Июнь	0,05	0,06	0,15	-0,13	-0,11	-0,06
Июль	0,02	0,05	0,07	-0,11	0,03	0,02
Август	-0,01	0,08	0,17	0,17	0,36	0,29
Сентябрь	-0,07	-0,18	-0,10	-0,16	-0,10	-0,09
Октябрь	0,08	-0,08	0,06	0,14	0,06	0,03
Ноябрь	-0,06	-0,18	-0,01	-0,05	-0,11	-0,09
Декабрь	0,04	0,01	0,18	0,03	0,04	0,04

Примечание: Достоверные значения выделены полужирным шрифтом.

Анализируя данные табл. 4, следует отметить немногочисленность достоверных коэффициентов корреляции и слабую тесноту связи между переменными. С точки зрения классических представлений экологии это объяснимо тем, что рассматриваемые виды произрастают в зоне оптимума, а отклонения отдельных метеопараметров от оптимальных значений вызывают погодичные колебания прироста. Однако каждый год изменяются разные метеопараметры, другими словами, лимитирующие прирост факторы неодинаковы год от года. При таком режиме климатической обусловленности формирования прироста корреляционный анализ не выявит тесных связей, как в случае, когда существует 1–2 лимитирующих прирост фактора, значения которых меняются по годам и определяют характер кратковременной изменчивости радиального прироста. Если сосредоточиться на влиянии климатических условий на прирост осины, то, во-первых, можно отметить, что по параметрам текущего года они имеют существенно отличное распределение коэффициентов корреляции. Это уместно объяснять тем, что хронология (осина 1) построена по деревьям, в значительной степени пораженным осиновым трутовиком, и физиология реакции этого вида на динамику климатических факторов существенным образом модифицирует результирующий итог влияния климатических факторов на колебания ширины годичного кольца. Во-вторых, положительное влияние на прирост осины оказывает повышенное количество осадков в июле в год формирования годичного кольца, при этом связь хотя и достоверна, но характеризуется низкой теснотой. В-третьих, обнаружена связь, специфичная лишь для осины (для обоих древостоев): положительная реакция прироста на увеличение количества осадков в августе в год, предшествовавший году формирования годичного кольца. Эта связь может иметь несколько вариантов экофизиологической интерпретации.

Таким образом, результаты кластерного анализа нашли подтверждение при дендроклиматическом анализе. Имеет смысл сопоставить их с данными других авторов. Для осины обыкновенной сравнительных данных практически нет, но для близкого по систематике вида (легко вступающего с осиной обыкновенной в гибридизацию) – осины американской (*P. tremuloides* Michx) – существует значительный объем опубликованных результатов дендроэкологических исследований на основе анализа годичных колец.

Исследования осины (*P. tremuloides* Michx.) в западной Канаде показали корреляцию между прошлыми событиями дефолиации насекомыми и образованием узких, аномально бледных колец деревьев [20]. Результаты данных исследований подтверждают обоснованность нашего предположения о наличии массового объедания листвы в Молокчинском заказнике в 2000 г.

Для осиновых лесов Аляски было изучено влияние климата и насекомых-филлофагов на радиальный рост [17]. Авторы обнаружили, что урожайность древесины снижалась с увеличением количества поврежденных листьев и не была чувствительна к наличию влаги в вегетационный период. Продуктивность снижалась в годы с высоким уровнем повреждения листвы, но затем восстанавливалась до значений перед вспышкой, в годы низкого повреждения насекомыми, что свидетельствует о высокой степени устойчивости осины к повреждению листьев вредителем *Phyllocnistis populiella*. В целом полученные авторами результаты указывают на то, что косвенные последствия распространения минера имеют большее влияние на продуктивность и физиологию осины.

ны, чем климат (в нынешних условиях), и этот факт необходимо учитывать при оценке роста, физиологии и прогнозе продуктивности осиновых лесов во внутренних районах Аляски. В контексте нашей работы важно, что в данном исследовании зафиксировано воздействие на прирост осины не только листогрызущих насекомых, но и насекомых, вызывающих минирование. До последнего времени уровень реального влияния насекомых-минеров на прирост древесных растений оставался дискуссионным.

Таким образом, закономерности развития локальной популяции осинового минера (в наших условиях это *Phytagromyza tridentata*), влияние климатических факторов на ее параметры будут оказывать действие на динамику радиального прироста осины. Возможно, часть короткопериодических составляющих в хронологиях осины формируется под воздействием флуктуаций плотности популяции осинового минера, этим же можно объяснить влияние ряда факторов, которые могут определять успешность зимовки вредителя, за пределами вегетационного сезона. Важно также, что, как и в нашем случае, в рассматриваемом исследовании установлено, что осадки в течение вегетационного сезона не оказывают выраженного действия на радиальный прирост по годам.

Дендроклиматический анализ роста гибридов осины был проведен учеными из Латвии [23]. Полученные данные в целом не противоречат нашим результатам.

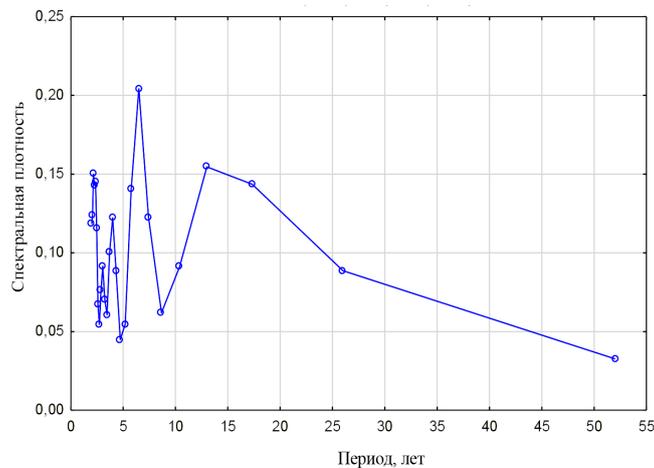
Коллективом канадских ученых выполнена комплексная оценка взаимосвязи между ростом деревьев и климатом [22]. Для этой цели использовались измерения дендрометром. В масштабах внутригодичного времени результаты показывают, что осадки, вероятно, являются основным фактором изменения радиуса ствола. Высокие температуры воздуха оказывали немедленное негативное влияние на содержание воды в стеблях из-за транспирации. Это было наиболее заметно в периоды снижения доступности влаги в корневой зоне, когда деревья более восприимчивы к потере чистого объема воды. Для периодов, в которые влажность не являлась ограничителем, была обнаружена положительная взаимосвязь между запаздывающей температурой воздуха и изменением радиуса ствола. Таким образом, повышенные температуры воздуха могут играть важную роль в стимулировании радиального роста при соблюдении требований к влажности.

Данные обзора литературы указывают на значимость дендроклиматических исследований роста древесных пород для мониторинга их состояния и прогнозирования изменений продуктивности.

Прирост древесных растений умеренных широт характеризуется циклической циклическостью колебаний [7, 11, 19, 21]. Существенным дополнением к анализу специфики формирования радиального прироста осины служат результаты исследования циклическости его колебаний на основе метода Фурье. Анализ Фурье позволяет получить объективные данные о наличии циклических компонент в рядах радиального прироста, даже когда при визуальном анализе рядов радиального прироста такая циклическость не просматривается. Результаты анализа для исследуемых хронологий отражают графики спектральной плотности на рис. 5–10. Число наблюдений на рис. 5–11 – 52; веса Хемминга – ,0357; ,2411; ,4464; ,2411; ,0357.

Рис. 5. Результаты спектрального анализа Фурье для хронологии древостоя березы в Молокчинском заказнике

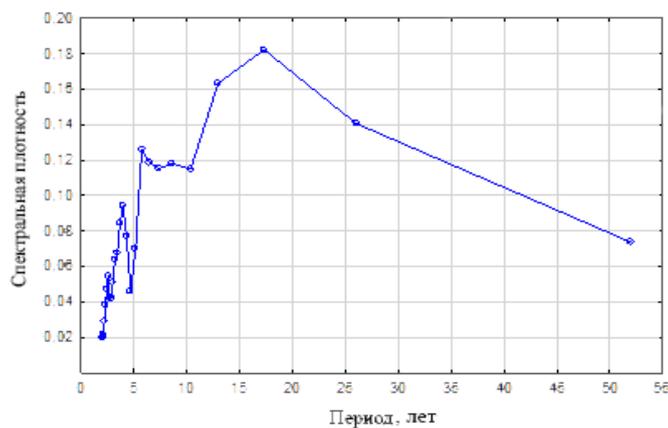
Fig. 5. The results of Fourier spectral analysis for the chronology of the birch stand in the Molokchinskiy Reserve



Спектрограмма для древостоя березы имеет несколько выраженных пиков, демонстрируя наличие циклических компонент с длиной цикла 13; 6,5; 4; 3,05 и 2,1 года. Наибольшей выраженностью обладает компонента с циклическостью 6,5 года, т. е. приблизительно 1/2 типичного солнечного цикла. Компонента с 13-летним периодом близка по значениям к условно 11-летней компоненте солнечного цикла – циклу Швабе. Цикл Швабе является одним из наиболее часто проявляющихся в изменчивости прироста древесных пород [7, 19]. Не исключено, что циклы 4; 3,05 и 2,1 года обусловлены эндогенными причинами функционирования организма деревьев (например, обилием плодоношения, которое у древесных пород обладает определенной периодичностью). Для березы повислой в условиях южной тайги циклическая компонента плодоношения оценивается в 1,2 года [8], что с биологической точки зрения может соответствовать только 2 годам, т. к. сезонные процессы вегетации дискретны и биологически осмысленная циклическость в их оценке возможна только с точностью до 1 года. Особенности плодоношения березы таковы, что после определенного порогового предела в плодоношении наблюдатель будет приписывать оценке плодоношения один и тот же, наивысший балл. Таким образом, некоторые компоненты циклическости в плодоношении березы могут ускользать из анализа в балльных временных рядах оценки интенсивности ее плодоношения.

Рис. 6. Результаты спектрального анализа Фурье для хронологии древостоя дуба в Молокчинском заказнике

Fig. 6. The results of Fourier spectral analysis for the chronology of the oak stand in the Molokchinskiy Reserve



В спектрограмме дуба четко выражена циклическая компонента длиной 17 лет. Важно и, по-видимому, биологически значимо, что такая же по циклу компонента (17,03 года) четко проявляется и в спектрограмме ели (рис. 7). Также обнаружены компоненты: с периодичностью 5,8 года (приблизительно 1/2 11-летнего цикла), которая может быть связана с чередованием в цикле ветвей роста и спада солнечной активности; с периодичностью 4,0 года, предположительно, связанная с плодоношением дуба. Для ранней формы дуба черешчатого в условиях южной тайги приводится периодичность плодоношения 3,9 года, т. е. полностью совпадающая с выявленной нами компонентой в цикличности прироста данного вида в условиях южной тайги [8].

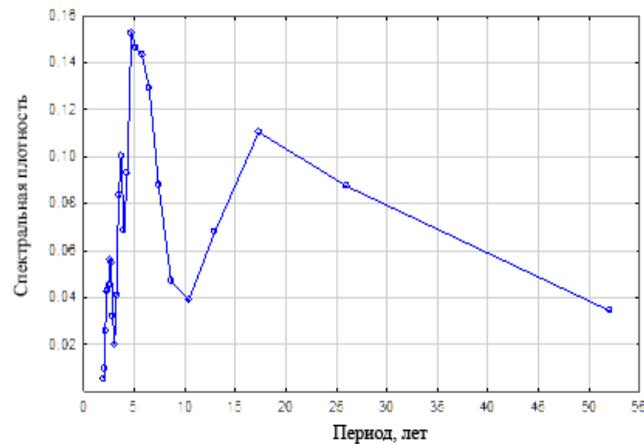


Рис. 7. Результаты спектрального анализа Фурье для хронологии древостоя ели в Молокчинском заказнике

Fig. 7. The results of Fourier spectral analysis for the chronology of the spruce stand in the Molokchinskiy Reserve

В спектрограмме для древостоя ели наиболее выражена циклическая компонента с периодом 4,2 года, чуть менее сильно выражена компонента 17,03 года. Компонента 4,2 года может быть увязана с эндогенно обусловленной циклическостью роста и развития дерева. Также присутствуют компоненты с периодом 4,7 и 3,7 года. Они, вероятно, связаны с циклическостью семеношения ели. Есть данные, что в годы обильного семеношения ширина годичного кольца у этого вида снижается на 40 % по сравнению с неурожайными, что объясняется перераспределением продуктов ассимиляции между процессами формирования урожая семян и новых слоев ксилемы [2]. Для ели в южной тайге приводятся данные о циклическости семеношения с периодом 3,9 года [8], что почти совпадает со средним значением между выявленными компонентами (4,2 года).

В динамике радиального прироста ольхи присутствует наиболее четко выраженная циклическая компонента 6,5 года. Эта же компонента наиболее выражена в динамике радиального прироста родственной ольхе и сходной с ней по лесоводственным свойствам березы (рис. 5). Такая динамика близка к 1/2 цикла Швабе, ее возможно трактовать как обусловленную солнечной активностью на ветвях роста и спада в этом цикле. Также присутствует компонента с периодом 3,7 года, объясняемая нами как обусловленная эндогенными процессами в организме дерева и совпадающая с периодичностью плодоношения ели и дуба.

Рис. 8. Результаты спектрального анализа Фурье для хронологии древостоя ольхи в Молокчинском заказнике

Fig. 8. The results of Fourier spectral analysis for the chronology of the alder stand in the Molokchinskiy Reserve

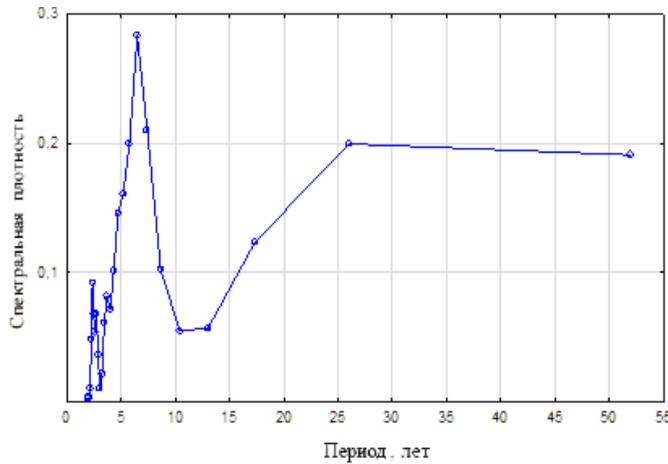
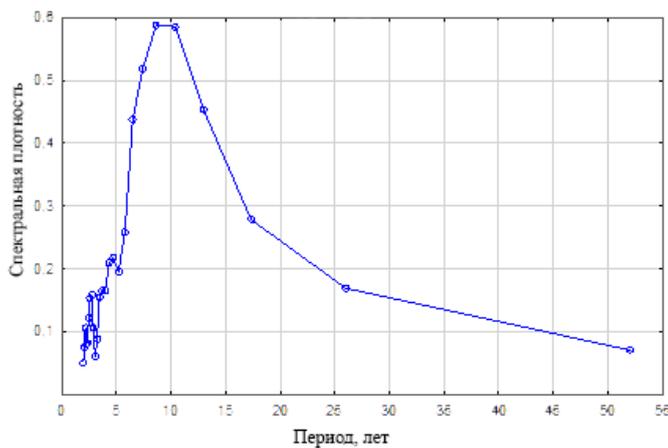


Рис. 9. Результаты спектрального анализа Фурье для хронологии древостоя осины (с деревьями, частично пораженными гнилью) в Молокчинском заказнике

Fig. 9. The results of Fourier spectral analysis for the chronology of the aspen stand (with the trees partially affected by rot) in the Molokchinskiy Reserve



Для хронологии древостоя осины, в котором около 50 % деревьев поражено ядровой гнилью, вызываемой осиновым трутовиком, выделяются 2 равные по значимости компоненты – 10,4 и 8,7 года. Первая совпадает с периодичностью цикла Швабе, и – что важно и, по-видимому, биологически не случайно – такая же по периоду компонента (10,4 года) наблюдается и во 2-й хронологии для древостоя осины, среди учетных деревьев которого практически отсутствуют пораженные гнилью (рис. 10). Есть также короткопериодические компоненты с длиной цикла 4,0 и 3,7 года.

На спектрограмме для хронологии, полученной по данным древостоя осины, среди учетных деревьев которого практически отсутствуют пораженные гнилью, читаются 2 примерно равнозначных компоненты (как и в другом древостое осины). Их период составляет 10,4 и 6,5 года. Есть короткопериодическая компонента с длиной цикла 3,7 года.

Для удобства восприятия материала имеет смысл также рассмотреть спектрограмму для временного ряда чисел Вольфа на изучаемом временном интервале (рис. 11).

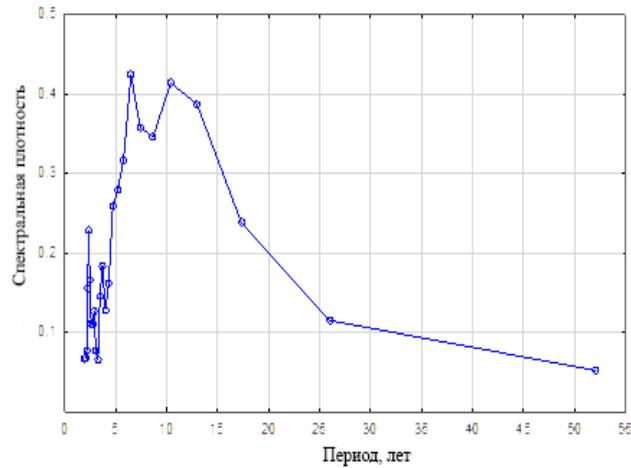


Рис. 10. Результаты спектрального анализа Фурье для хронологии древостоя осины (с деревьями, не пораженными гнилью) в Молокчинском заказнике

Fig. 10. The results of Fourier spectral analysis for the chronology of the aspen stand (with the trees not affected by rot) in the Molokchinskiy Reserve

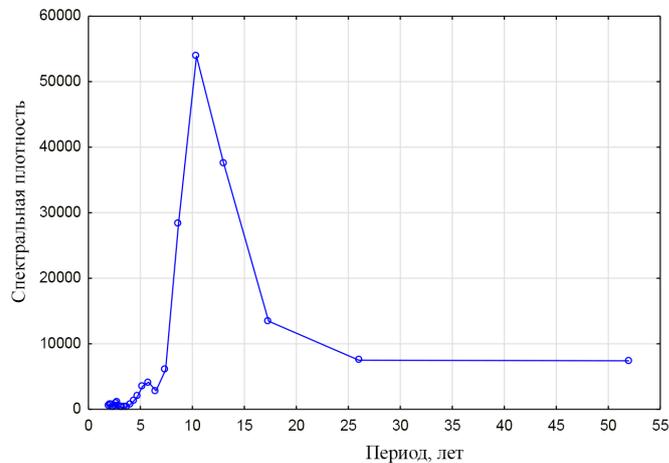


Рис. 11. Результаты спектрального анализа Фурье для ряда чисел Вольфа за период 1964–2016 гг.

Fig. 11. The results of Fourier spectral analysis for the series of Wolf numbers for 1964–2016

Обобщенные данные цикличности динамики прироста для разных хронологий в период 1964–2016 гг. представлены в табл. 5.

Подводя итог, следует сделать ряд обобщений. Во-первых, в динамике прироста разных лет не были выявлены циклические компоненты, превышающие 17 лет. Зафиксированная 17-летняя компонента близка к 22-летнему циклу солнечной активности (цикл Хейла) [1].

Для древостоев осины обнаружена циклическая компонента (10,4 года), полностью совпадающая с циклическостью чисел Вольфа за рассматриваемый период, что говорит о наиболее ярко выраженном влиянии 11-летнего солнечного цикла на прирост данной породы. Таким образом, результаты кластерного и дендроклиматического анализа совпадают с результатами спектрального анализа Фурье в том аспекте, что изменчивость прироста в древостоях осины специфична по сравнению с другими исследованными лесообразующими породами.

Сходные по лесоводственным свойствам осина и береза демонстрируют наличие циклической компоненты с периодом 6,5 года, что соответствует существованию в пределах цикла Швабе так называемых ветвей солнечной активности (ветви роста и спада активности). Эта же компонента (6,5 года) проявляется в спектрограмме одного из древостоев осины. По-видимому, компоненты с периодом, близким к 5 годам, в хронологиях дуба (5,8 года) и ели (4,7 года) также совпадают с циклом Швабе.

Таблица 5

**Обобщенные результаты анализа Фурье для индексированных хронологий
изученных лесобразующих пород за период 1964–2016 гг.
в сравнении с результатами анализа временного ряда чисел Вольфа
The generalized results of Fourier analysis for indexed chronologies
of the studied forest-forming species for 1964–2016 in comparison
with the results of the analysis of the time series of Wolf numbers**

Временной ряд	Период, лет	Спектральная плотность
Ель	17,3	0,11
	4,7	0,15
	5,2	0,15
	3,7	0,10
Дуб	17,3	0,18
	5,8	0,13
	4,0	0,09
Береза	13,0	0,15
	6,5	0,20
	4,0	0,12
	3,1	0,09
	2,1	0,15
Ольха	6,5	0,28
	3,7	0,08
Осина 1	10,4	0,58
	8,7	0,59
	4,0	0,16
	3,7	0,17
Осина 2	10,4	0,41
	6,5	0,42
	3,7	0,17
Число Вольфа	10,4	53 896,17

Есть основания увязывать циклические компоненты с периодичностью 4,0; 3,7; 3,05; 2,01 года с эндогенными физиологическими процессами роста и развития древесных растений. Циклическая компонента 3,7 года выявлена в 4 хронологиях (2 хронологии осины, ольха и ель). Следует добавить, что известный лесовед М.Г. Романовский неоднократно высказывал предположение о том, что короткопериодические составляющие в динамике радиального прироста возникают как автоколебания и только синхронизируются средой [9, 10].

Анализируя выявленную циклическость, уместно обратиться к мнению М.Г. Романовского и его соавтора Р.В. Щекалева [11], составивших ряд замечаний по поводу этого процесса, самое важное из которых сводится к тому, что все зависимости опосредованы и размыты из-за индивидуальной и видовой изменчивости, т. к. и виды, и отдельные особи имеют разные пороги мутационно-репарационной активности.

Заключение

По итогам исследования на основе числовых методов (кластерный анализ, корреляционный анализ, анализ Фурье) была установлена уникальность наследственных экологических свойств осины среди основных лесообразующих пород. Возможно, это следует объяснять как эффект существования локального осинового древостоя в качестве единого суперорганизма, внутри которого между отдельными экземплярами стволов деревьев осуществляется обмен веществом, энергией и фитогормональной информацией. С точки зрения ответа на климатические факторы эта уникальность связана с положительной реакцией на повышенное количество осадков в августе в год, предшествовавший году формирования годичного кольца, и может быть экофизиологически интерпретирована. С учетом результатов гармонического анализа эта специфичность обусловлена наличием в изменчивости прироста осины циклической компоненты с периодом 10,4 года, полностью совпадающей с циклической компонентой временного ряда чисел Вольфа на исследуемом временном интервале. Исходя из полученных данных, осина представляется ценным объектом дендрохронологических исследований, информацию, которую дает анализ ее хронологий, можно использовать для ретроспективной реконструкции экологических изменений среды, не фиксирующихся в изменчивости прироста ели европейской и дуба черешчатого. Данный факт делает актуальным построение долгосрочных хронологий осины, в т. ч. с применением древесины деревянных построек, в которых она хорошо сохраняется.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. *Витинский Ю.И.* Солнечная активность. М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1983. 192 с.
Vitinskiy Yu.I. *Solar Activity*. Moscow, Nauka Publ., Chief Editorial Board of Physical and Mathematical Literature, 1983. 192 p. (In Russ.).
2. *Данилов Д.Н.* Влияние плодоношения на структуру годичного слоя у ели (*Picea excelsa* Link.) // Ботан. журн. 1953. Т. 38, № 3. С. 367–377.
Danilov D.N. The Effect of Fruiting on the Structure of the Spruce (*Picea excelsa* Link.) Annual Ring. *Botanicheskij zhurnal*, 1953, vol. 38, no. 3, pp. 367–377. (In Russ.).
3. *Драгавцев В.А.* Эколого-генетическая модель организации количественных признаков растений // С.-х. биология. 1995. Т. 30, № 5. С. 20–30.
Dragavtsev V.A. Ecogenetic Organization Model of Quantitative Plant Properties. *Sel'skohozyajstvennaya biologiya = Agricultural Biology*, 1995, vol. 30, no. 5, pp. 20–30. (In Russ.).
4. *Драгавцев В.А.* Идентификация адаптивных полигенных систем у отдельных деревьев популяции хвойных пород // Генетика и селекция на службе лесу: тез. докл. Междунар. науч.-практ. конф., Воронеж, 28–29 июня 1996 г. Воронеж: НИИЛГИС, 1996. С. 7.
Dragavtsev V.A. Identification of Adaptive Polygenic Systems in Individual Trees of the Coniferous Population. *Genetics and Breeding at the Service of the Forest: Abstracts of the Reports of the International Scientific and Practical conference* (Voronezh, June 28–29, 1996). Voronezh, Research Institute of Forest Genetics and Breeding, 1996, p. 7. (In Russ.).
5. *Драгавцев В.А.* Некоторые новые фундаментальные подходы в экологической генетике растений // С.-х. биология. 2000. Т. 35, № 1. С. 34–36.

Dragavtsev V.A. Some New Basic Approaches in Plant Ecological Genetics. *Sel'skohozyajstvennaya biologiya* = Agricultural Biology, 2000, vol. 35, no. 1, pp. 34–36. (In Russ.).

6. Драгавцев В.А. К проблеме генетического анализа полигенных количественных признаков растений. СПб.: ВИР, 2003. 32 с.

Dragavtsev V.A. *On the Problem of Genetic Analysis of Polygenic Quantitative Traits in Plants*. St. Petersburg, All-Russian Institute of Plant Genetic Resources Publ., 2003. 32 p. (In Russ.).

7. Матвеев С.М. Цикличность в динамике радиального прироста естественных и искусственных сосновых древостоев в борах Центральной лесостепи // Вестн. МГУЛ – Лесн. вестн. 2014. Т. 18, № 5. С. 110–116.

Matveev S.M. Cyclicity in Radial Growth Dynamics of Natural and Artificial Scotch Pine Stands in Pine Woods of the Central Forest Steppe. *Lesnoy vestnik* = Forestry Bulletin, 2014, vol. 18, no. 5, pp. 110–116. (In Russ.).

8. Редько Г.И., Мерзленко М.Д., Бабич Н.А. Лесные культуры: в 2 ч. М.: Юрайт, 2019. Ч. 1. 197 с.

Red'ko G.I., Merzlenko M.D., Babich N.A. *Forest Cultures*: in 2 parts. Moscow, Yurajt Publ., 2019, part 1. 197 p. (In Russ.).

9. Романовский М.Г. Индивидуальная изменчивость ширины годичных слоев и равнослойность древесины // Вопросы лесовыращивания и рационального лесопользования. М.: МЛТИ, 1983. С. 138–140. (Науч. тр. / МЛТИ; вып. 148).

Romanovsky M.G. Individual Variability of the Width of Annual Rings and Uniformity of Wood. *The Issues of Forest Cultivation and Rational Forest Management*: Collection of Scientific Works of Moscow Forestry Institute. Moscow, Moscow Forestry Institute Publ., 1983, iss. 148, pp. 138–140. (In Russ.).

10. Романовский М.Г. Перспективы моделирования динамики годичного прироста древесных растений как функции абиотических факторов // Рациональное использование и воспроизводство лесных ресурсов. М.: МЛТИ, 1992. С. 72–74. (Науч. тр. / МЛТИ; вып. 256).

Romanovsky M.G. Prospects for Modeling the Dynamics of Annual Growth of Woody Plants as a Function of Abiotic Factors. *Rational Use and Reproduction of Forest Resources*: Collection of Scientific Works of Moscow Forestry Institute. Moscow, Moscow Forestry Institute Publ., 1992, iss. 256, pp. 72–74. (In Russ.).

11. Романовский М.Г., Щекалев Р.В. Лес и климат центральной полосы России. М.: Правда Севера, 2009. 95 с.

Romanovsky M.G., Shchekalev R.V. *Forest and Climate of Central Russia*. Moscow, Pravda Severa Publ., 2009. 95 p. (In Russ.).

12. Румянцев Д.Е. Диагностика экологических требований хвойных интродуцентов на основе дендрохронологической информации // Бюл. ГБС. 2004. Вып. 188. С. 36–40.

Rumyantsev D.E. Diagnostics of Ecological Requirements in Introduced Conifers on the Basis of Dendrochronological Information. *Byulleten' Glavnogo botanicheskogo sada* = Bulletin of the Main Botanical Garden, 2004, iss. 188, pp. 36–40. (In Russ.).

13. Румянцев Д.Е., Александрова М.С. Дендрохронологическая диагностика отдельных экологических свойств у видов *Picea* // Бюл. ГБС. 2006. Вып. 190. С. 87–93.

Rumyantsev D.E., Alexandrova M.S. Dendrochronological Diagnostics of Individual Ecological Characteristics in the genus *Picea*. *Byulleten' Glavnogo botanicheskogo sada* = Bulletin of the Main Botanical Garden, 2006, iss. 190, pp. 87–93. (In Russ.).

14. Румянцев Д.Е., Мельник П.Г., Александрова М.С. Генотипические компоненты изменчивости величины радиального прироста // Вестн. МГУЛ – Лесн. вестн. 2006. № 5(47). С. 124–128.

Rumyantsev D.E., Melnik P.G., Alexandrova M.S. Genotypic Components of Variability of the Radial Increment. *Lesnoy vestnik* = Forestry Bulletin, 2006, no. 5(47), pp. 124–128. (In Russ.).

15. Соболев А.Н., Феклистов П.А., Грязькин А.В., Гаевский Н.П., Барзут О.С. Рост древостоев разных пород в одинаковых условиях местопроизрастания на Большом Соловецком острове // Лесн. вестн. / Forestry Bulletin. 2022. Т. 26, № 2. С. 24–30.
Sobolev A.N., Feklistov P.A., Gryazkin A.V., Gaevsky N.P., Barzut O.S. Multispecies Stands Growth in Similar Growing Conditions on Bolshoy Solovetsky Island. *Lesnoy vestnik = Forestry Bulletin*, 2022, vol. 26, no. 2, pp. 24–30. (In Russ.). <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2022-2-24-30>
16. Халафян А.А. *Statistica 6. Статистический анализ данных*. М.: Бином-Пресс, 2008. 512 с.
Khalafyan A.A. *Statistica 6. Statistical Data Analysis*. Moscow, Binom-Press Publ., 2008. 512 p. (In Russ.).
17. Boyd M.A., Berner L.T., Doak P., Goetz S.J., Rogers B.M., Wagner D., Walker X.J., Mack M.C. Impacts of Climate and Insect Herbivory on Productivity and Physiology of Trembling Aspen (*Populus tremuloides*) in Alaskan Boreal Forests. *Environmental Research Letters*, 2019, vol. 14, art. no. 085010. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab215f>
18. Cook E., Briffa K., Shiyatov S., Mazepa V. Tree-Ring Standardization and Growth Trend Estimation. *Methods of Dendrochronology: Applications in the Environment Science*. Springer Science + Business Media Dordrecht, 1992, chapt. 3.3, pp. 104–108.
19. 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 Institution of Washington, 1919. 127 p. <https://doi.org/10.5962/bhl.title.121855>
20. Hogg E.H., Hart M., Liefers V.J. White Tree Rings Formed in Trembling Aspen Saplings Following Experimental Defoliation. *Canadian Journal of Forest Research*, 2002, vol. 32, no. 11, pp. 1929–1934. <https://doi.org/10.1139/x02-114>
21. Lovelius N.V. *Dendroindication of Natural Processes and Anthropogenic Influences*. St. Petersburg, World & Family-95, 1997. 320 p.
22. Maillet J., Nehemy M.F., Mood B., Pappas C., Bonsal B., Laroque C. A Multi-Scale Dendroclimatological Analysis of Four Common Species in the Southern Canadian Boreal Forest. *Dendrochronologia*, 2022, vol. 72, art. no. 125936. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2022.125936>
23. Šēnhofa S., Zeps M., Matisons R., Smilga J., Lazdina D., Jansons Ā. Effect of Climatic Factors on Tree-Ring Width of *Populus* hybrids in Latvia. *Silva Fennica*, 2016, vol. 50, no. 1, art. no. 1442. <https://doi.org/10.14214/sf.1442>
24. Fritts H.C. *Tree Rings and Climate*. London, New York, San Francisco, Academic Press, 1976. 567 p.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest

Вклад авторов: Все авторы в равной доле участвовали в написании статьи
Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article