

УДК 630\*907.1

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АВТОКОРРЕЛЯЦИИ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ  
СКРЫТОЙ ПЕРИОДИЧНОСТИ В ДЕНДРОХРОНОЛОГИЧЕСКИХ РЯДАХ**

**Е.В. ДЕГТЯРЕВА; канд. с.-х. наук, доц. А.А. БОЛБОТУНОВ;  
канд. техн. наук, доц. А.М. ДЕГТЯРЕВ  
(Полоцкий государственный университет)**

*Рассматривается возможность использования автокорреляции для выявления периодичности в шкалах радиального прироста хвойных пород. Приведены примеры использования метода для сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris*). На основании ряда шкал Белорусского Поозерья вычислены наиболее вероятные периоды динамики роста сосны в различных условиях местопроизрастания.*

**Ключевые слова:** дендрохронология, автокорреляция, периодичность, анализ временных рядов, ширина годичного кольца, хвойные породы деревьев, радиальный прирост хвойных.

**Введение.** Периодичность колебаний ширины годичных колец – один из наиболее актуальных вопросов в дендроклиматологии. Если периодичность в дендрошкалах существует и сохраняется достаточно длительное время, появляется возможность, используя циклические математические модели, достаточно точно прогнозировать величину радиального прироста, а значит и обуславливающие прирост внешние факторы. В этой области велись обширные исследования, подробно описанные в литературе [1–3]. Периоды выявлялись в разных условиях на разных континентах и для различных древесных пород. Выявлены как короткие (2–6 лет), так и длинные (до 300 лет) ритмы роста. Родоначальник дендрохронологии А.Э. Дуглас исследовал цикличность многовековых шкал секвойи и сосны желтой [4]. Русский климатолог Ф. Шведов в 1892 году заметил периодичность в ширине годичных колец белой акации и сделал прогноз наступления очередной засухи, который полностью оправдался.

На территории Советского союза большая часть исследований проводилась в Западной Сибири, на Урале, в Забайкалье в условиях роста древесных растений на крайнем пределе своего существования, там, где динамика роста в наибольшей степени обусловлена климатическими факторами и цикличность проявляется в большей мере [3; 5; 6].

В условиях, близких к условиям Белорусского Поозерья, этот вопрос рассматривали литовские исследователи [1]. Так, например, по результатам их исследований для сосны обыкновенной на свежих местопроизрастаниях в Литве преобладают ритмы годичного прироста 9–13 лет [1]. В Беларуси также проводятся дендрохронологические исследования [2; 7–9].

Циклы, обнаруженные в радиальном приросте деревьев, изменчивы по длительности, амплитуде и форме. По длительности обычно подразделяются на внутривековые, вековые и сверхвековые [3]. Для выявления цикла необходимо, чтобы протяженность ряда данных была по крайней мере в два раза больше предполагаемого цикла. Разработанные нами дендрошкалы для Белорусского Поозерья имеют продолжительность до 270 лет, а значит, внутривековые (до 60 лет) и вековые (60–120 лет) циклы могут быть обнаружены. Сверхвековые (свыше 120 лет) циклы роста хвойных древесных пород на территории Беларуси можно получить, лишь используя археологические образцы древесины.

**Методы исследований.** Ранее периоды выявлялись в основном визуально по шкале, а значит, использовались только те шкалы, где циклы проявлялись явно и отчетливо. Используя скользящее среднее добивались наиболее четкой картины, а изменяя величину окна, выявляли циклы различной длительности. Как правило, величина окна изменялась от 5 до 30 лет для внутривековых циклов и до 50 лет для вековых. Брать окно больше этого значения не имеет смысла, поскольку из-за малой амплитуды (меньше 10%) график вырождается в линию.

Другие математические методы выявления цикличности в шкалах достаточно изучены. Самые известные из них – коррелограмма, построенная по автокорреляции; периодограмма по коэффициентам ряда Фурье; сингулярное разложение: анализ главных компонент; другие [3; 6].

Для примера возьмем две шкалы радиального прироста сосны обыкновенной, на одной из которых явно видны повторяющиеся циклы (рисунок 1), на второй визуальное выделение периодов затруднено (рисунок 2). На рисунке 1 представлена дендрохронологическая шкала, разработанная для сосны на постоянной пробной площади (ППП) № 14 в гидроморфных условиях произрастания (сосняк багульниково-сфагновый). Значения представлены в относительных величинах (%), которые получают делением на скользящее среднее (окно 20 лет), тем самым убирая тренд, характерный для всех дендрошкал в силу особенностей роста дерева в разном возрасте (гиперболический тренд – период большого роста) [1]. На графике хорошо заметна цикличность величины радиального прироста.



Рисунок 1. – Динамика ширины годичного кольца на ППП № 14



Рисунок 2. – Динамика ширины годичного кольца на ППП № 9

Еще один пример выявления периода рассмотрим для дендрохронологической шкалы, разработанной для соснового древостоя на ППП 9 в полугидроморфных условиях (сосняк черничный). Как видно, на рисунке 2 визуально определить период затруднительно.

На рисунках 3 и 4 представлены эти же данные, сглаженные скользящим средним, по которым можно подсчитать количество лет между верхними или нижними пиками и усреднить значение, тем самым получив средний период.

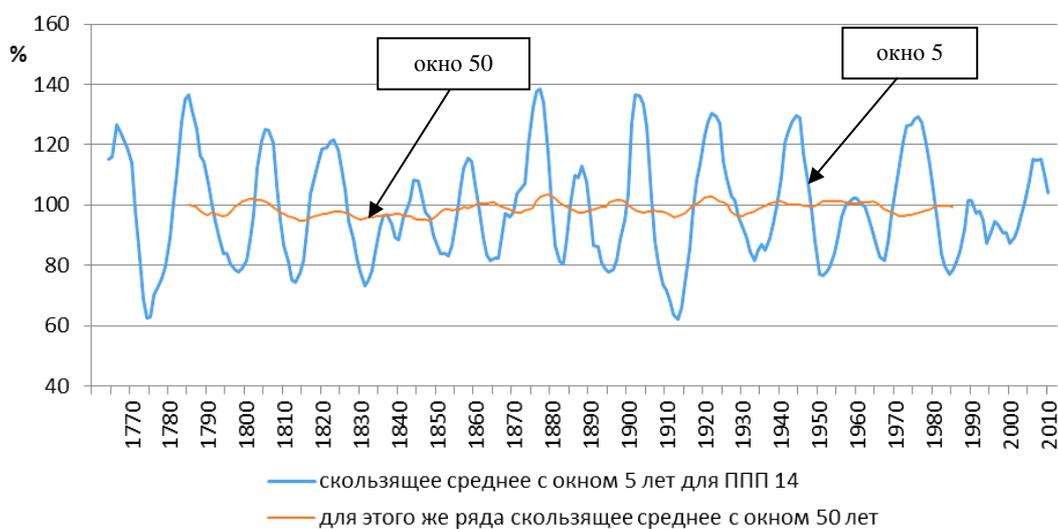


Рисунок 3. – Сглаженные ряды радиального прироста пробной площади № 14



Рисунок 4. – Сглаженные ряды радиального прироста пробной площади № 9

При сглаживании шкалы ППП14 усредненный период равен 17-ти годам, амплитуда колебаний до 70%. Увеличивая окно до 50 лет, получаем едва заметный период в 75 лет с амплитудой около 8%. Для ППП9 просматривается цикл в 16–17 лет, а при дальнейшем сглаживании еще один, слабо выраженный цикл, порядка 35 лет. Очевидно, что интерпретация данных и конечный результат сильно зависят от выбранного окна и личного опыта исследователя.

**Автокорреляционный метод.** Выявление цикличности методом корреляционного анализа может выполняться как вручную, так и в любом математическом программном продукте, в том числе в Excel. Суть метода достаточно проста – найти наибольший парный коэффициент корреляции Пирсона ( $r$ ) между исследуемым рядом и этим же рядом, но сдвинутым на 1, 2 и так далее элементов (шаг или лаг автокорреляции).

Максимальный сдвиг при расчете автокорреляции обычно допускают от 0,1 до 0,5 длительности ряда [10]. В дендрохронологических рядах достаточно большое количество элементов и статистическая достоверность обеспечивается и при  $n/2$  шагов (0,5 ряда). Это позволяет не только выявить цикл, но и подтвердить его, а при необходимости и скорректировать на 1–2 года.

Построенная на рисунке 5 коррелограмма (гистограмма значений коэффициентов автокорреляции по шагам) показывает наибольшие коэффициенты при сдвиге на 18 лет ( $r = 0,31$ ). Обычно на этом результате и останавливаются, проанализировав следующие всплески, которые приходятся на 36, 53, 69, 85, 100, 118 лет, можно несколько скорректировать вывод – в этих цифрах лучше просматривается 17-летний цикл. Этот вывод для данной шкалы можно подтвердить и визуальным способом, сдвинув на графике исходный ряд на 17 лет, достаточно хорошо будет заметно совпадение экстремальных лет.

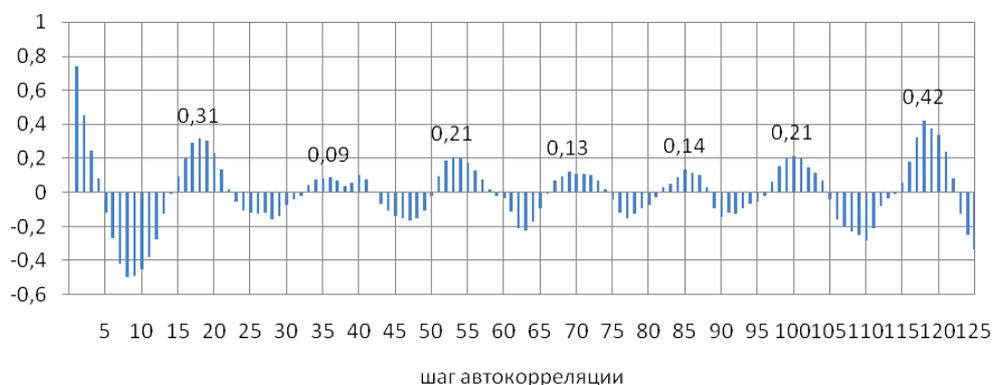


Рисунок 5. – Коррелограмма дендрохронологической шкалы ППП14

Повышение коэффициентов корреляции на шаге 53 и 100 лет дает основания полагать о наличии полувековой цикличности. Достаточно высокий коэффициент автокорреляции на 118-м шаге ( $r = 0,42$ )

свидетельствует о вековом цикле длительностью более 100 лет, который в силу протяженности шкалы пока нельзя подтвердить и скорректировать.

Значимость коэффициентов автокорреляции можно проверить по следующей формуле:

$$-\frac{t}{\sqrt{n-i}} \leq r_i \leq \frac{t}{\sqrt{n-i}}, \quad (1)$$

где  $n$  – число элементов в исходном ряду;  $i$  – шаг автокорреляции;  $t$  – вероятностный коэффициент [10].

Для вероятности 0,95 этот коэффициент будет равен  $t = 1,96$ . Коэффициент автокорреляции можно считать значимым с вероятностью 0,95, если он не попадает в интервал, рассчитанный по формуле (1).

Для рассматриваемых на коррелограмме (рисунок 5) пиков автокорреляции интервалы будут соответственно  $\pm 0,13$ ;  $\pm 0,13$ ;  $\pm 0,14$ ;  $\pm 0,15$ ;  $\pm 0,15$ ;  $\pm 0,16$ ;  $\pm 0,17$ . В данном случае в интервал попадает только коэффициент  $r = 0,09$ , вычисленный при шаге 36. Таким образом, его можно считать незначимым, остальные – значимыми с вероятностью 0,95.

Построенная коррелограмма для ППП9 (рисунок 6) также явно показывает наличие цикличности процесса. Наибольшие коэффициенты получены при сдвиге на 17, 33, 49 лет. Значимость коэффициентов автокорреляции подтверждается рассчитанными по формуле (1) интервалами, которые соответственно равны  $\pm 0,20$ ;  $\pm 0,22$ ;  $\pm 0,25$ . Таким образом, период у этой шкалы 16...17 лет.

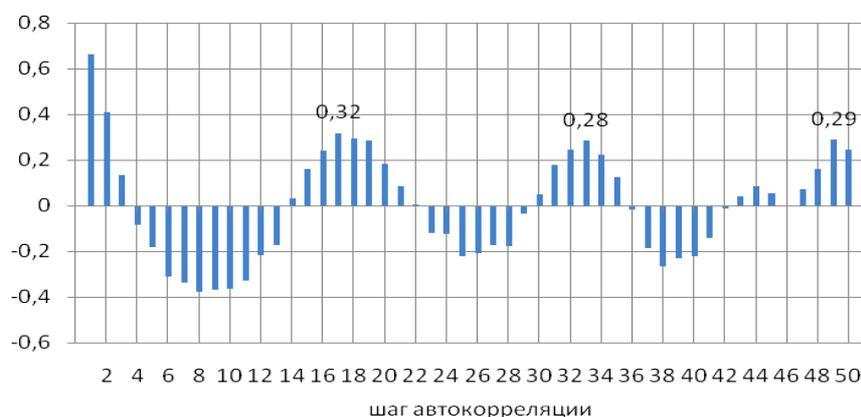


Рисунок 6. – Коррелограмма дендрохронологической шкалы ППП9

Как показали исследования, метод выявления цикличности через коэффициенты корреляции для дендрошкел достаточно стабилен. При удалении от 1 до 20 первых элементов (начало ряда) или столько же последних (конец ряда) коррелограмма меняется незначительно. Изменяются, как правило, величины коэффициентов, а не расположение пиков. Период в этом случае изменяется не более чем на год, что вполне допустимо для естественных процессов такой длительности.

В таблице 1 представлены результаты определения периодов радиального прироста сосны Белорусского Поозерья в разных условиях местопрорастания.

Таблица 1. – Периоды дендрошкел сосны обыкновенной Белорусского Поозерья

№	Название пробной площади	Длина шкалы, лет	Тип леса, условия местопрорастания	Коэффициент вариации	Период	Коэффициент автокорреляции	Интервал значимости
1	2	3	4	5	6	7	8
<i>Гидроморфные условия</i>							
1	ППЗ04	118	сфагновый, А <sub>5</sub>	0,27	19	0,20	0,20
2	Ельня	79	сфагновый, А <sub>5</sub>	0,21	14	0,29	0,24
3	ППП15	245	багульниковый, А <sub>4</sub> –А <sub>5</sub>	0,29	21	0,36	0,13
4	ППП14/1	251	багульниково-сфагновый, А <sub>4</sub>	0,23	17	0,31	0,13

Окончание таблицы 1

1	2	3	4	5	6	7	8
5	ППП14/2	163	чернично-сфагновый, А <sub>4</sub>	0,17	16	0,18	0,16
6	Колпино	156	багульниково-сфагновый, А <sub>5</sub>	0,31	15*	0,14	0,16
7	ППП60	110	багульниковый, А <sub>4</sub> -А <sub>5</sub>	0,27	14	0,23	0,20
8	ППП10	109	чернично-долгомошный, В <sub>4</sub>	0,23	17	0,32	0,20
9	Лесопарк	93	чернично-долгомошный, А <sub>4</sub>	0,27	14	0,17	0,22
<i>Полугидроморфные условия</i>							
1	ППП9	108	черничный, В <sub>3</sub>	0,17	17	0,32	0,21
2	кв35	99	кисличный, В <sub>3</sub>	0,17	21*	0,15	0,22
3	ППП41	126	елово-черничный, В <sub>3</sub>	0,13	20	0,19	0,19
4	ППП51	98	кисличный, В <sub>3</sub>	0,14	12*	0,17	0,22
5	мк8-10	118	мшисто-брусничный, А <sub>2</sub> -А <sub>3</sub>	0,12	21	0,21	0,20
6	ППП5	109	черничный, А <sub>3</sub>	0,18	10*	0,05	0,20
7	Мостовуха	141	орляково-кисличный, С <sub>2</sub> -В <sub>2</sub>	0,15	19*	0,15	0,18
8	ППП19	108	орляково-черничный, В <sub>2</sub>	0,18	12*	0,17	0,20
9	ПП108	140	орляково-мшистый, А <sub>2</sub> -В <sub>2</sub>	0,16	18*	0,05	0,18
10	Парк Сш4	61	газон	0,19	5*	0,25	0,25
<i>Автоморфные условия местопроизрастания</i>							
1	ППП8	100	мшисто-черничный, А <sub>2</sub>	0,16	17	0,30	0,22
2	ППП40	127	брусничный, А <sub>2</sub>	0,17	18	0,24	0,19
3	ГБ невр	143	газон, А <sub>2</sub>	0,26	17	0,22	0,17
4	ПП 270	85	мшистый, А <sub>2</sub>	0,15	17	0,20	0,26
5	ППП4	118	мшисто-черничный, А <sub>2</sub>	0,14	13*	0,14	0,19
6	ГБ род	135	мшистый, А <sub>2</sub>	0,17	18	0,26	0,18
7	ПП 30-31	139	брусничный, А <sub>2</sub>	0,17	20	0,18	0,18
8	ППП1	93	брусничный, А <sub>2</sub>	0,18	13	0,45	0,22
9	ППП6	119	вересково-брусничный, А <sub>2</sub>	0,15	13*	0,11	0,19
10	Козьянки	119	брусничный, А <sub>2</sub>	0,27	20	0,29	0,20
11	ПП116	157	брусничный, А <sub>2</sub>	0,17	16	0,19	0,16
* – вероятность значимости коэффициента меньше 0,95 и результат не подтвержден последующими вычислениями.							

В некоторых случаях, когда шкалы составлены для насаждений с ярко выраженным техногенным, пирогенным, мелиоративным воздействием, с длительными или временными рекреационными нагрузками природные циклы выражены гораздо слабее или не видны вовсе.

Две рассмотренные выше шкалы, также находясь в санитарно защитной зоне города Новополоцка, подвергались и большому количеству атмосферных выбросов промышленного узла, и некоторому изменению водного режима (ППП14) в связи с осушением прилегающей территории под гаражи. Но и это обстоятельство не нарушило их естественную периодичность. В ходе исследований встречались и дендрошкалы, не позволявшие выявить цикличность, например, древостои, попавшие из гослесфонда в город-

ское озеленение и подвергавшиеся реконструкциям, или естественные древостои, чья периодичность хоть и заметна, но статистически не значима.

Обращает на себя внимание и подтверждается численно (см. таблицу 1) давно замеченный факт, что чем ближе находится насаждение к пределу своего существования, тем больше разброс значений ряда радиального прироста (выше коэффициент вариации) и тем ярче выражена периодичность. В наиболее оптимальных, полугидроморфных, условиях циклы выявлялись с меньшей достоверностью.

Диаграммы частоты и длительности периодов дендрошквал сосны, исключив неблагонадежные результаты, представлены на рисунке 6. Величина циклов варьируется от 10 лет до 21 года. Наибольшая встречаемость у периода составляет 17 лет.

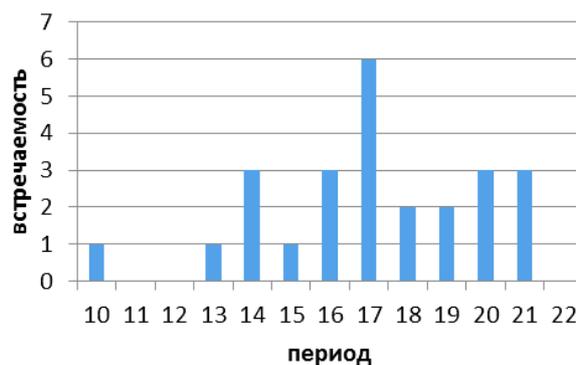


Рисунок 6. – Встречаемость периодов в шкалах радиального прироста сосны Белорусского Поозерья

У девяти исследованных дендрошквал ели европейской коэффициент вариации в среднем составил 0,22, периодичность – 12...19 лет. Для лиственницы было просчитано 7 шкал: коэффициент вариации в среднем – 0,25, периодичность – 11...19, 28 лет.

#### Выводы

У большинства, исследованных дендрошквал хвойных пород подтверждается наличие цикличности, что показывает возможность использования периодических моделей для математического моделирования и дальнейшего прогнозирования динамики радиального прироста, а также климатических условий как основного фактора, лимитирующего рост дерева.

Определение периодичности радиального прироста деревьев возможно с помощью коэффициентов автокорреляции. Этот метод показал себя математически простым и при этом достаточно объективным, наглядным, эффективным и устойчивым. В сравнении с методом скользящего среднего использование автокорреляции в большей степени исключает личностный фактор при анализе процесса.

Результаты исследований показали:

- периодичность роста сосновых насаждений на территории Белорусского Поозерья составляет порядка 13...20 лет;
- главным фактором, обуславливающим появление периодичности в дендрохронологических рядах, является климат, однако длительность, амплитуда и форма периодов зависят также и от условий местопроизрастания, и от влияния неклиматических факторов (техногенных, биогенных);
- в наиболее благоприятных для роста условиях цикличность шкал выражена слабее, а дисперсия и коэффициент вариации у таких рядов меньше.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Битвинскас, Т.Т. Дендроклиматические исследования / Т.Т. Битвинскас. – Л. : Гидрометеоздат, 1974. – 170 с.
2. Хвойные леса Беларуси в современных климатических условиях (дендроклиматический анализ) / В.Н. Киселев [и др.] ; под общ. ред. В.Н. Киселева. – Минск : Право и экономика, 2010. – 202 с.
3. Шиятов, С.Г. Дендрохронология верхней границы леса на Урале / С.Г. Шиятов. – М. : Наука, 1986. – 138 с.
4. Douglass, A.E. Climatic cycles and tree growth / A.E. Douglass. – Carnegie Institution of Washington, V. 1–3. – Washington, 1936.

5. Ваганов, Е.А. Дендроклиматические исследования в Урало-Сибирской Субарктике / Е.А. Ваганов, С.Г. Шиятов, В.С. Мазепа. – Новосибирск : Наука, 1996. – 246 с.
6. Шишов, В.В. Нелинейное оценивание дендроклиматических данных и его применение для территории Сибири / В.В. Шишов, М.И. Попкова, И.И. Тычков. – Красноярск : ОООРПБ «Амальгама», 2016. – 128 с.
7. Болботунов, А.А. Дендрохронологический мониторинг реперных лет экстремальных значений радиального прироста хвойных пород в национальном парке «Нарочанский» / А.А. Болботунов, Е.В. Дегтярёва // Вестник Полоцкого государственного университета. Сер. F, Строительство. Прикладные науки. – 2014. – № 8. – С. 120–125.
8. Пугачевский, А.В. Динамика лесного покрова Беларуси в условиях меняющегося климата / А.В. Пугачевский, М.В. Ермохин, А.Г. Герасимович // Отечественная геоботаника: основные вехи и перспективы: материалы Всерос. конф., Санкт-Петербург, 20–24 сент. 2011 г. – СПб., 2011. – Т. 2 : Структура и динамика растительных сообществ. Экология растительных сообществ. – С. 189–193.
9. Смоляк, Л.П. Влияние рельефа на изменчивость радиального прироста сосны / Л.П. Смоляк, А.А. Болботунов, В.С. Романов // Дендрохронология и дендроклиматология. – Новосибирск, 1986. – С. 114–122.
10. Андерсон, Т. Статистический анализ временных рядов / Т. Андерсон. – М. : Мир, 1976. – 756 с.

Поступила 02.04.2018

#### USING AUTOCORRELATION FOR DETECTION HIDDEN PERIODICITY IN DENDROCHRONOLOGICAL SERIES

*E. DEGTJAREVA, A. BOLBOTUNOV, A. DEGTJAREV*

*The article considers the possibility of using autocorrelation to determine the periodicity in the radial increment of coniferous species. Examples of the use of the method for pine (*Pinus sylvestris*) are given. Based on a number of dendroscale in the northern part of Belarus, the most probable periods of pine growth dynamics have been calculated under various conditions of the site of occurrence.*

**Keywords:** *dendrochronology, autocorrelation, periodicity, time series analysis, the width of the annual ring, coniferous trees, the radial increment of conifers.*