

УДК 551.510:630*561.24
DOI: 10.18799/24131830/2023/12/4282
Шифр специальности ВАК: 05.13.16

Аддитивная сингулярная спектральная модель дендрохронологического сигнала

В.В. Зуев¹, С.Л. Бондаренко¹, И.Г. Устинова²✉

¹ Институт мониторинга климатических и экологических систем Сибирского отделения
Российской академии наук, Россия, г. Томск

² Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

✉ igu@tpu.ru

Аннотация

Актуальность исследования обусловлена тем, что выделение структурных компонент в дендрохронологическом сигнале годовых колец хвойных деревьев расширяет возможности метода биоиндикации и позволяет получить информацию об изменениях условий окружающей среды в прошлом для протяженных территорий. **Цель:** создание аддитивной сингулярной спектральной модели на основе частотных тригонометрических компонент дендрохронологического сигнала; реконструкция изменений общего содержания озона в атмосфере в прошлом, влияющих на уровень ультрафиолетового излучения диапазона B (280–315 нм). **Объекты:** временные ряды общего содержания озона в атмосфере (данные с 1932 г.), ширины и плотности годовых колец (данные 1686–2004 гг.) на примере территории вблизи обсерватории в Ароза, Швейцария, временной ряд стабильных изотопов кислорода $\delta^{18}O_c$, Франция. **Методы:** анализ временных рядов (декомпозиция временного ряда, идентификация параметров модели, прогнозирование временного ряда), статистический анализ (F-критерий, χ^2 – критерий Пирсона), экспериментальные измерения процентных составляющих древесины годовых колец, корреляционный анализ, спектральный сингулярный анализ. **Результаты.** Разложение дендрохронологического сигнала отдельных хронологий на тригонометрические компоненты в программе Saterpillar. Корреляционный анализ чувствительности деревьев на атмосферное воздействие. Реконструкция уровня озона в стратосфере по первой тригонометрической компоненте дендрохронологического сигнала. В целлюлозе, первой низкочастотной компоненте сигнала и структурной компоненте древесины, регистрируется достоверный отклик деревьев на долгопериодные колебания общего содержания озона, что позволяет оценить влияние стрессового фактора на условия эксплуатации лесных ресурсов. Использование данных по ширине годовых колец позволяет расширить территориальные границы метода.

Ключевые слова: Общее содержание озона в атмосфере, УФВ радиация, временной ряд, тренд, сингулярный спектральный метод, структура древесины, дендрохронологический метод.

Благодарности: Исследование выполнено в рамках госбюджетной темы № 121031300156-5.

Для цитирования: Зуев В.В., Бондаренко С.Л., Устинова И.Г. Аддитивная сингулярная спектральная модель дендрохронологического сигнала // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2023. – Т. 334. – № 12. – С. 56–64. DOI: 10.18799/24131830/2023/12/4282

UDC 551.510:630*561.24
DOI: 10.18799/24131830/2023/12/4282

Additive singular spectral model of a dendrochronological signal

V.V. Zuev¹, S.L. Bondarenko¹, I.G. Ustinova²✉

¹ Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Tomsk, Russian Federation

² National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

✉ igu@tpu.ru

Abstract

Relevance. Allocation of structural components in a dendrochronological signal of annual rings of coniferous trees expands the possibilities of the bioindication method and allows obtaining information about changes in environmental conditions in the past for extended territories. **Aim.** Creation of an additive singular spectral model based on the frequency trigonometric components of the dendrochronological signal; reconstruction of changes in the total ozone content in the atmosphere in the past, affecting the level of ultraviolet radiation in the B range radiation. **Objects.** Time series of total ozone content in the atmosphere (data from 1932), width and density of annual rings (data from 1686–2004) on the example of the territory near the observatory in Arosa, Switzerland, time series of stable oxygen isotopes $\delta^{18}\text{O}_c$, France. **Methods.** Time series analysis (decomposition of a time series, identification of model parameters, prediction of a time series), statistical analysis (F-criterion, χ^2 – Pearson criterion), experimental measurements of the percentage components of the wood of annual rings, correlation analysis, spectral singular analysis. **Results.** Decomposition of the dendrochronological signal of individual chronologies into trigonometric components in the Caterpillar program. Correlation analysis of the sensitivity of trees to atmospheric effects. Reconstruction of the ozone level in the stratosphere using the first trigonometric component of the dendrochronological signal. In cellulose, the first low-frequency component of the signal and the structural component of wood, a reliable response of trees to long-period fluctuations in the total ozone content is recorded. This allows assessment of the impact of the stress factor on conditions of exploitation of forest resources. The use of data on the width of the annual rings allows you to expand the territorial boundaries of the method.

Keywords: Total ozone content in the atmosphere, UV-B radiation, time series, trend, singular spectral method, wood structure, dendrochronological method.

Acknowledgements: The study was carried out within the framework of the state budget theme no. 121031300156-5.

For citation: Zuev V.V., Bondarenko S.L., Ustinova I.G. Additive singular spectral model of a dendrochronological signal. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2023, vol. 334, no. 12, pp. 56–64. DOI: 10.18799/24131830/2023/12/4282

Введение

Применение метода биоиндикации эффективно для оценки влияния условий окружающей среды на растительность, реконструкции и прогноза долгопериодных колебаний атмосферных параметров. Предлагаемая модель декомпозиции дендрохронологического сигнала стволовой древесины (dendrochronologic signal – DS) поддерживает применение метода биоиндикации для многих параметров, но изложение материала в статье сфокусировано на реконструкции и прогнозе общего содержания озона в атмосфере (ОСО). Спектр солнечного излучения на поверхности земли зависит от состояния атмосферы. ОСО определяет уровень падающего на Землю ультрафиолетового (УФ) излучения, а на растительность влияет в основном излучение коротковолнового диапазона В (УФВ). В [1] показано, как образующиеся за вегетационный период годовые кольца хвойных деревьев откликаются на изменения ОСО (УФВ) и какая информация содержится в этих откликах.

Реконструкция изменений летних температур воздуха, количества осадков и стратосферного озона выполняется методом множественной регрессии. Для разделения DS на климатические (температура, осадки) и радиационные (ОСО) отклики в качестве аналога метода главных компонент использовался сингулярный спектральный анализ [2]. Решения задач реконструкции и прогноза колебаний ОСО представляют собой проблему из-за малого интервала пересечения данных дендрохронологических и инструментальных наблюдений.

Свойства древесины как природного полимера и композита мало используются при анализе откликов растущего дерева. Тем не менее декомпозиция структуры годовых колец на элементы, отвечающие за прирост, влажность и прочность, может оказаться информативнее, чем декомпозиция DS на климатические составляющие разной природы. На древесное вещество, состоящее из целлюлозы, гемицеллюлозы и лигнина, приходится, например, в кедровой сосне 70–90 % углеродосодержащей матрицы древесного вещества. В годовых клетках в зависимости от сезонных изменений формируются слои с клетками и пустотами разного размера, а годовое кольцо можно считать заполненным древесным веществом, водой и углекислым газом в видоизмененных климатом и ОСО пропорциях [3, 4].

Использование плотности годовых колец позволяет реконструировать ОСО (УФВ) с высокой степенью достоверности, но отсутствие базы необходимых данных не позволяет составить в большом пространственно-временном диапазоне картину прошлых и будущих изменений ОСО [5, 6]. В статье предлагается рассмотреть также для реконструкции ОСО другую характеристику годового прироста – ширину годовых колец, сопоставимую с плотностью древесного слоя толщиной в один ряд клеток. Для сравнения – в измерениях рентгенографической плотности используют тонкий срез древесины керны, взятого из ствола растущего дерева [7].

Колебательный характер свойств древесины, ее плотности и ширины является результатом влияния

условий роста на образование тканей, в частности, на соотношение структурных компонент в единице объема [8].

Цель – разработать алгоритм реконструкции ОСО в прошлом и будущем на основе модели декомпозиции дендрохронологического сигнала хвойных, позволяющей группировать и отсекаать отклики дерева на изменения ОСО по структурным элементам для любых координат, для которых имеются данные.

Данные

Временные ряды среднемесячных значений ОСО – наблюдения в обсерватории Ароза, Швейцария, с 1932 по 2015 гг. [9], координаты 47°22' с.ш., 08°33' в.д., высота 475 м над уровнем моря. В опубликованных данных начало ряда часто привязывают к 1932 г. – началу регулярных и точных наблюдений за ОСО.

Временные ряды с 1686 по 2004 гг. максимальной плотности и ширины годовых колец европейской лиственницы, произрастающей в местности рядом с Ароза, Швейцария, на высоте над уровнем моря 2200 м, координаты 46 с.д., 8 град в.д. [10, 11].

Временной ряд с 1326 по 2004 гг. содержания стабильных изотопов кислорода в древесно-кольцевой целлюлозе, процентное соотношение, координаты 48 с.ш., 45.7 с.ш.: 2.7 в.д. $\delta^{18}\text{O}_c$ [12]. Данные использовались для идентификации первой компоненты – целлюлозы. Также на показатель $\delta^{18}\text{O}_c$ влияет смена климатического фактора в засушливом периоде. Результаты их анализа показали, что информации $\delta^{18}\text{O}_c$ имеет более слабый физиологический компонент, а зависимость от климата более сильная [13]. Если сопоставить временной ряд ОСО (УФВ) с временным рядом засушливости климата по коэффициенту де Мортонна [1], то в стволовой древесине можно наблюдать синергетические эффекты воздействия обоих факторов, усиливающие климатические аномалии. Этот момент может повлиять на достоверность реконструированных данных [14].

Методы

Конечная цель биоиндикации – определение связей между исследуемыми параметрами с последующей реконструкцией их прошлых и будущих изменений.

Дендрохронологический сигнал в годовых кольцах – аддитивный временной ряд колебаний отдельных структурных компонент древесины. В древесине годового кольца три основные компоненты – углеродосодержащая матрица, вода и углекислый газ. Углеродосодержащая матрица в свою очередь состоит из целлюлозы, гемицеллюлозы и лигнина [8]. Можно продолжить процесс декомпозиции, но в дан-

ной модели мы остановимся на 7 компонентах, описание которых приведено в табл. 1.

Программа Caterpillar SSA 3.40 [15] позволяет разложить дендрохронологический сигнал на отдельные гармоники и матрицы собственных векторов и реконструировать тригонометрические компоненты сигнала по процентному содержанию структурных компонент, как в плотности, так и ширине годового кольца. Согласно измерениям, процент объемного содержания компонент в древесине варьируется в разных диапазонах гармонических колебаний. Экспериментально установленные для кедровой сосны значения приведены в [3]. Для древесины других пород нужны отдельные эксперименты.

Одним из ретроспективных методов прогноза временных рядов с циклическими колебаниями является сингулярный спектральный анализ (ССА). Ретроспективное прогнозирование [16] разбивается сначала в прошлом, а затем проверяется на последующем, т. е. информация делится на две части. Первая часть используется для моделирования. Далее по математической модели строится прогноз на последующий период, ошибка прогноза характеризует точность моделирования. В то же время необходимо учитывать, что прогноз получен при использовании только части данных, что также влияет на точность.

По результатам исследования атмосферного озона [17, 18] и данным плотности годовых колец хвойных деревьев описаны алгоритмы реконструкции ОСО. При их помощи можно получить результат с различной, но достаточно высокой степенью достоверности. Достоверность зависит от степени корреляции исследуемых рядов и их длины.

Алгоритм реконструкции ОСО по хронологиям плотности годового кольца (ПГК) из банка дендрохронологических данных можно представить в виде следующих этапов:

1. Среднемесячные значения ОСО усредняются за весь вегетационный период (часть года, в течение которой происходит основное развитие дерева для данной местности).
2. Учитывается запаздывание биологического отклика дерева на изменения ОСО, совпадающее с квазидвухлетним колебанием ОСО, временные ряды сглаживаются.
3. Первоначально декомпозиция DS осуществлялась по природе отклика. Оценивалась корреляция между временными рядами ОСО и хронологиям характеристик годовых колец. Если корреляция отсутствовала, то считаем, что дендрохронологические данные не содержат отклик на ОСО. Такие хронологии удалялись из выборки. При использовании новой модели ССА декомпозиция DS затем осуществляется по структурному признаку [19].

4. Если мы хотим выполнить декомпозицию характеристик годовых колец по амплитуде, то данные должны быть переведены в индексы. Поэтому для реконструкции исследуемые параметры, ширину или плотность годовых колец переводят в индексы.
5. По сумме выбранных компонент при условии высоких значений коэффициента корреляции ОСО и DS строится реконструкция ОСО методом множественной регрессии. Реконструкции ОСО по плотности годовых колец описаны в статьях [20, 21].

Применению опубликованных алгоритмов реконструкции ОСО препятствует отсутствие в свободном доступе хронологий ПГК для создания пространственно-временной картины прошлых изменений ОСО на территориях среднеширотных лесов. Поэтому рассмотрим возможность использования для тех же целей хронологий по ширине годовых колец, сопоставимых с плотностью слоя толщиной в один ряд клеток.

Временные ряды первых компонент хронологий ширины и плотности совпадают с высокой степенью корреляции (0,8). Расхождения рядов объясняются неоднородностью древесины ядра внутри годового кольца. Компонента целлюлозы составляет около 50 % от древесного вещества в кольце и 65 % от суммы всех компонент дендрохронологического сигнала (DS), что согласуется с экспериментальными данными. Заполнение годового кольца целлюлозой (стенки клеток) формирует каркас твердотельной матрицы. Целлюлоза выполняет опорную функцию материала и является обязательным компонентом клеточной стенки в годовом кольце. Если степень заполнения древесного кольца целлюлозой и ее прирост под влиянием ОСО отличается причинно-следственная связь высокой значимости, то это позволяет реконструировать ОСО (УФВ) за вегетационный период.

Итак, представим нормированный дендрохронологический сигнал $\text{IndexDS}(t)$ или временной ряд годовых изменений амплитуды характеристик древесины по времени t в виде суммы его составляющих, выраженных индексами амплитуды тригонометрических компонент древесины (табл. 1):

$$\text{IndexDS}(t) = \sum_i^7 \text{IDS}(t)_i,$$

где $\text{IDS}(t)_1$ характеризует содержание в годовых кольцах древесного вещества из углеродных соединений целлюлозы, $\text{IDS}(t)_2$ – гемицеллюлозы и $\text{IDS}(t)_3$ – лигнина; $\text{IDS}(t)_4$ – содержания в годовых кольцах связанной воды и растворенного в ней углекислого газа, а также воды в полостях между волокнами древесины; $\text{IDS}(t)_5$ – содержание в годовых кольцах CO_2 определяется объемом пустот в клетках древесины; $\text{IDS}(t)_6$ – содержание смолы

и микроэлементов; $\text{IDS}(t)_7$ – шумовой и стохастический компонент.

Структурные и тригонометрические составляющие дендрохронологического сигнала в годовых кольцах индексируются согласно табл. 1. Приравняв размер окна в программе Caterpillar числу рассматриваемых компонент древесины (7): древесное вещество (арматура древесной матрицы) – 1, гемицеллюлоза (опорный конструкционный материал и, возможно, резервное питательное вещество) – 2, ароматическое вещество лигнин (наполнитель арматуры, образуется в основном в поздней стадии вегетационного процесса) – 3, вода в стенках клеток и межклеточном пространстве – 4, углекислый газ CO_2 – 5, смола, минеральные элементы – 6, шумовая компонента – 7.

Таблица 1. Структурные и тригонометрические составляющие дендрохронологического сигнала в годовых кольцах. $\text{IndexDS}(t) = \sum_i^7 \text{ICt}_i(t)$, где $i = \overline{1;7}$, $\text{ICt}_i(t)$ характеризует индекс амплитуды тригонометрической компоненты, соответствующей структурной компоненте, i – количество выбранных для модели структурных компонент

Table 1. Structural and trigonometric components of the dendrochronological signal in annual rings. $\text{IndexDS}(t) = \sum_i^7 \text{ICt}_i(t)$, where $i = \overline{1;7}$, $\text{ICt}_i(t)$ characterizes the amplitude index of the trigonometric component corresponding to the structural component, i is the number of structural components selected for the model

Структурные компоненты древесины Structural components of wood	Тригонометрические компоненты DS Trigonometric components of DS	Амплитуда отклика Response amplitude
Целлюлоза DS ₁ Cellulose DS ₁	Ct_1	$\text{ICt}_1(t)$
Гемицеллюлоза DS ₂ Hemicellulose DS ₂	Ct_2	$\text{ICt}_2(t)$
Лигнин DS ₃ Lignin DS ₃	Ct_3	$\text{ICt}_3(t)$
Вода в стенках клеток и межклеточном пространстве DS ₄ Water in cell walls and intercellular space DS ₄	Ct_4	$\text{ICt}_4(t)$
Углекислый газ в пустотах DS ₅ Carbon dioxide in DS ₅ voids	Ct_5	$\text{ICt}_5(t)$
Другие отклики: смола и микроэлементы DS ₆ Other responses: resin and trace elements DS ₆	Ct_6	$\text{ICt}_6(t)$
Шум DS ₇ Noise DS ₇	Ct_7	$\text{ICt}_7(t)$

Первая тригонометрическая компонента

Древесную составляющую годового кольца можно считать гармоническим сигналом. Для обоснования этого факта мы выделили в данных древесной матрицы тригонометрическую составляющую вида:

$$\hat{Tr}(t) = a_0 + \sum_{k=1}^{\frac{n}{2}-1} a_k \cos\left(\frac{2\pi k}{T} t\right) + \sum_{k=1}^{\frac{n}{2}-1} b_k \sin\left(\frac{2\pi k}{T} t\right) + a_{\frac{n}{2}}, \quad (1)$$

где

$$a_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (U_i - y_i), \quad a_k = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n (U_i - y_i) \cos\left(\frac{2\pi k}{n} i\right),$$

$$b_k = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n (U_i - y_i) \sin\left(\frac{2\pi k}{n} i\right) \text{ и } a_{\frac{n}{2}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (-1)^i (U_i - y_i).$$

В нашем исследовании рассматривается аддитивная модель временного ряда вида:

$$U_t = Tr_t + \varepsilon_t,$$

где Tr_t – тригонометрическая составляющая и ε_t – случайная компонента.

Используя данные древесной составляющей (143 значения ряда), получили что расхождение тригонометрической составляющей исходного ряда и результата работы программы Caterpillar SSA со стандартизованными данными равно нулю (рис. 1).

Рассматривались выборки из 17 хронологий как по ширине, так и по максимальной плотности годичных колец для одного временного диапазона 1686–2004 гг. Чувствительные к ОСО (УФВ) данные (10 хронологий) были отобраны в новые выборки, и уже эти данные использовались по отдельности для сингулярного спектрального разложения. Полученные хронологии $DS_1(t)$ усреднялись.

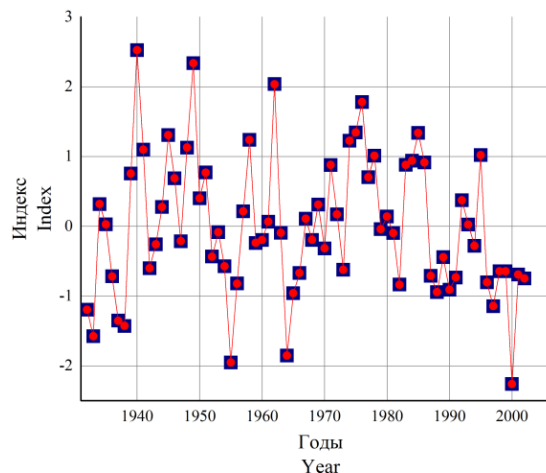


Рис. 1. Сравнение индексов результата выделения тригонометрической составляющей исходного ряда по формулам (1) и результата работы программы Caterpillar SSA со стандартизованными данными

Fig. 1. Comparison of the indices of the result of the initial series trigonometric component selection according to formulas (1) and the result of the Caterpillar SSA program with standardized data

Таблица 2. Связь характеристик дендрохронологий
Table 2. Relationship of dendrochronology characteristics

Связь параметров DS_1 Relation of DS_1 parameters	Коэффициент корреляции R в 1932–2004 Correlation coefficient R for 1932–2004
Ширина–ОСО/Width–TOC	–0,7
Плотность–ОСО/Density–TOC	–0,7
$\delta^{18}O_c$ –ОСО/ $\delta^{18}O_c$ –TOC	–0,7
Ширина–Плотность Width–Density	0,9

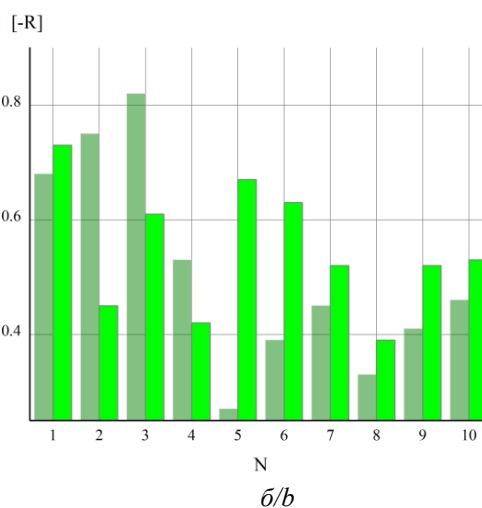
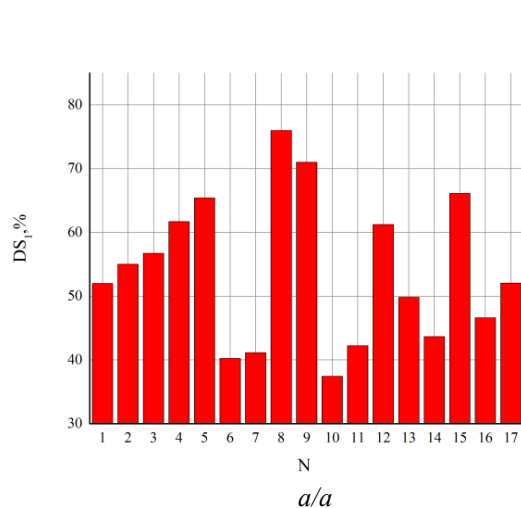


Рис. 2. а) заполнение целлюлозой годичного кольца или % разложения $ICt_1(t)$ в древесно-кольцевой хронологии для ширины; б) влияние ОСО (УФВ) на DS_1 для ширины и плотности УФВ чувствительных хронологий. Коэффициенты корреляции ОСО и ширины годичного кольца – темный столбец, ОСО и максимальной плотности – светлый столбец, R – коэффициент корреляции

Fig. 2. а) cellulose filling of the annual ring or % of $ICt_1(t)$ decomposition in wood-ring chronology for width; б) total ozone content (TOC) influence on DS_1 for width and density of N chronologies in a sample of UVB-sensitive trees. The correlation coefficients of TOC and the width of the annual ring have a dark column, TOC and maximum density have a light column. R is the correlation coefficient

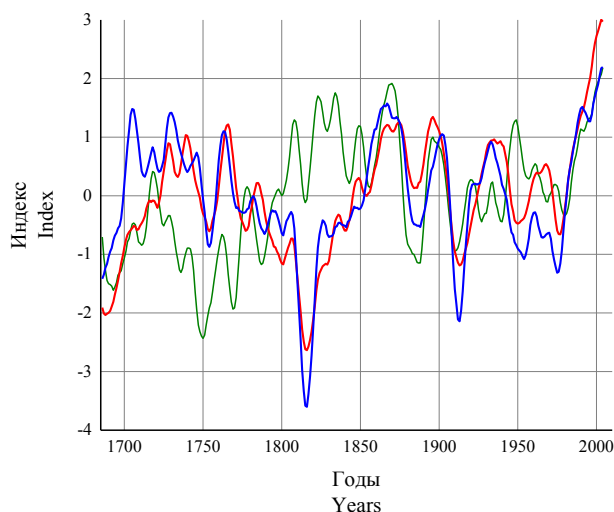


Рис. 3. Первая тригонометрическая составляющая $ICt_1(t)$ в древесно-кольцевой целлюлозе для ширины (красная линия), максимальной плотности (синяя линия), стабильных изотопов кислорода $\delta^{18}O_c$ (зеленая линия)

Fig. 3. First trigonometric component $ICt_1(t)$ in wood-ring cellulose for width (red line), maximum density (blue line), stable oxygen isotopes $\delta^{18}O_c$ (green line)

На рис. 4. приведена периодограмма за калибровочный временной интервал 1932–2004.

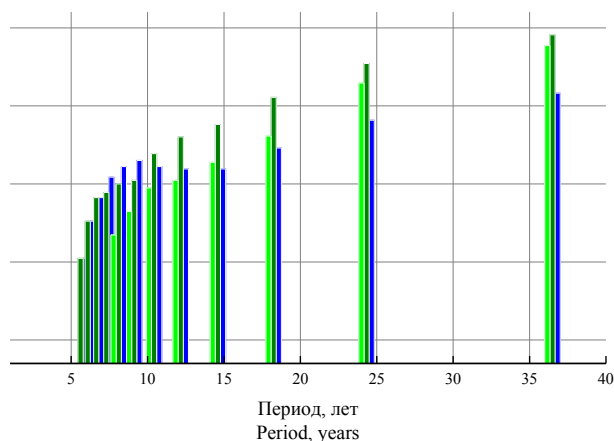


Рис. 4. Периодограмма первой компоненты $ICt_1(t)$ по ширине (оливковый цвет) и плотности (светло-зеленый) годовых колец и временного ряда ОСО с апреля по сентябрь (синий цвет)

Fig. 4. Periodogram of $ICt_1(t)$ first component by width (olive color) and density (light green) of annual rings and the time series of the TOC from April to September (blue color)

На рис. 5 приведена реконструкция ОСО, выполненная методом множественной регрессии по хронологии $ICt_1(t)$, $R=0,7$, $F=59,6$, $R^2=0,45$, количество точек 73.

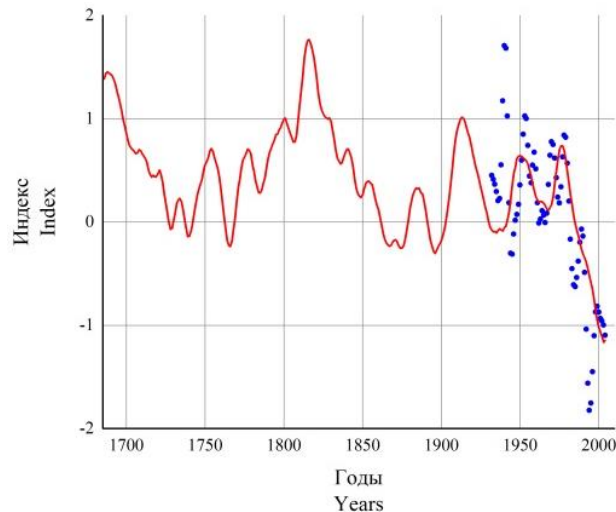


Рис. 5. Реконструкция изменений ОСО по первой структурной компоненте стволовой древесины. Синие точки – инструментальные измерения. Красная линия – реконструированные значения ОСО для вегетационного периода

Fig. 5. Reconstruction of TOC changes in the first structural component of the stem wood. The blue dots are instrumental measurements. The red line is the reconstructed TOC values

Обсуждение и заключение

В статье был рассмотрен вклад ОСО (УФВ) фактора в изменчивость годовых приростов древесины хвойных по аддитивной сингулярной спектральной модели дендрохронологического сигнала годовых колец хвойных. В основу модели положены экспериментальные данные о процентном соотношении структурных составляющих годовичного кольца в твердом (древесное вещество), жидком (вода в стенках клеток и межклеточном пространстве) и газообразном (углекислый газ в пустотах) состоянии. Ранее показано, что все компоненты DS можно представить как тригонометрические функции отклика деревьев на изменения условий окружающей среды. Выделенная низкочастотная компонента сингулярного спектрального разложения DS на 7 составляющих (подобрано эмпирически) имеет разное процентное содержание в DS, что связано с различием в откликах дерева на климатические изменения от года к году. Но в целом природа колебаний первой компоненты определяется годовым приростом целлюлозы, обеспечивающим прочный каркас годовичного кольца. Хотя используемые для сравнения данные по содержанию стабильных изотопов кислорода в годовичных кольцах относятся к деревьям для другой территории, лежащей в зоне однородных изменений ОСО, коэффициенты корреляции между DS_1 и ОСО высоки, в пределах 0,7, а сходство между временными ходами структурных компонент в пределах $R=0,8$.

Таким образом, был разработан алгоритм деления дендрохронологического сигнала на компоненты, характеризующие отклики дерева на воздействия окружающей среды в древесной матрице (целлюлоза), воде и углекислом газе, нуждающийся в дальнейшем экспериментальном подтверждении для различных пород хвойных деревьев.

Процентное содержание изотопов кислорода целлюлозы ($\delta^{18}\text{O}_\text{C}$) в годовичном кольце хорошо коррелируют с плотностью и шириной годовичных колец только на определенных временных интервалах. Так, для периода с 1932 по 2004 гг., когда рост ОСО сопровождался нарастающей сухостью климата (отрицательный тренд индекса де Мортоне), корреляция между хронологиями по ширине, плотностью и содержанию изотопов в годовичных кольцах целлюлозы высокая, $R=0,6$, но ниже для других временных интервалов, что, возможно, связано с различием климатических условий для юга Франции и Арозы, Швейцария. Тем не менее высокий уровень корреляции в калибровочный период позволяет отнести первую структурную компоненту разложения DS к целлюлозе.

Компонента дендрохронологического сигнала, связанная с целлюлозой, для лиственницы составляет в среднем 50 % сигнала. Колебания первых компонент ширины и плотности в годовичном кольце

имеют одинаковый частотный спектр в диапазоне 7–40 лет. Заполненные целлюлозой стенки клеток годовичного кольца формируют каркас твердотельной матрицы. Целлюлоза выполняет опорную функцию материала и является обязательным компонентом в годовичном кольце. Степень заполнения древесного кольца целлюлозой под влиянием климата можно отнести к показателям жизнестойкости дерева, ухудшение условий роста приводит к увеличению доли целлюлозы в структуре годовичного кольца.

Показана возможность дендрохронологического метода в исследовании влияния атмосферных параметров на основе временных рядов данных по ширине годовичного кольца, длительные хронологии которых доступны в сети интернет для большого количества регионов.

Новизна решения задачи реконструкции связана с декомпозицией дендрохронологического сигнала по структурным составляющим древесины. Достоверность результатов обеспечивается статистически значимой выборкой данных и продолжительным интервалом пересечения данных ОСО и дендрохронологий. Применение модели при прогнозировании атмосферных изменений может быть успешно для программ рационального природопользования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bondarenko S.L., Savchuk D.A. Response of conifers to UV-B and climate in mountain areas // *Global Journal of Environmental Science and Management*. – 2018. – V. 4. – № 3. – P. 299–314.
2. Golyandina N., Zhigljavsky A. *Singular spectrum analysis for time series*. – New York: Springer, 2020. – 146 с. URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-662-62436-4> (дата обращения: 01.06.2023).
3. Кузнецова В.В., Аникеева М.В., Врублевская В.И. Антифрикционный природный композит и его строение // *Труды БГТУ. Серия 1: Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов*. – 2017. – № 1 (192). – С. 125–134. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/antifriktsionnyy-prirodnyy-kompozit-i-ego-stroenie> (дата обращения: 01.06.2023).
4. Позитронная спектроскопия древесной структуры сосны сибирской кедровой / К.П. Арефьев, А.Л. Бондаренко, С.Л. Бондаренко, А.М. Лидер, Р.С. Лаптев, Ю.С. Бордулев, А.Н. Михайлов // *Известия высших учебных заведений. Физика*. – 2014. – Т. 57. – № 11-2. – С. 261–265.
5. Шишов В.В. Визуализация и анализ дендроклиматической информации на основе интерактивной системы дендроклиматического мониторинга: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Красноярск, 2009. – 41 с.
6. Силкин П.П. Методы многопараметрического анализа структуры годовичных колец хвойных. – Красноярск: Изд-во Сибирского федерального университета, 2010. – 335 с.
7. Методы дендрохронологии. Ч. 1: Основы дендрохронологии. Сбор и получение древесно-кольцевой информации / С.Г. Шиятов, Е.А. Ваганов, А.В. Кирдянов, В.Б. Круглов, В.С. Мазепа, М.М. Наурзбаев, Р.М. Хантемиров / под ред. Е.А. Ваганова, С.Г. Шиятова. – Красноярск: Краснояр. гос. ун-т, 2000. – 80 с.
8. Рыжова Н.В., Шутов В.В. *Физика древесины*. – Кострома: Изд-во КГТУ, 2009. – 75 с.
9. Index of /archive/Summaries/TotalOzone/Monthly_Means. URL: https://woudc.org/archive/Summaries/TotalOzone/Monthly_Means/ (дата обращения 7.12.2021).
10. WSL Dendro Database. URL: <https://www.ncei.noaa.gov/access/paleo-search> (дата обращения 07.12.2021).
11. On the compatibility of Brewer total column ozone measurements in two adjacent valleys (Arosa and Davos) in the Swiss Alps / R. Stübi, H. Schill, J. Klausen, L. Vuilleumier, J. Grobner, L. Egli, D. Ruffieux // *Meas. Tech.*. – 2017. – V. 10. – P. 4479–4490. URL: <https://doi.org/10.5194/amt-10-4479-2017> (дата обращения 07.12.2021).
12. The unknown third – hydrogen isotopes in tree-ring cellulose across Europe / V. Vitali, E. Martínez-Sancho, K. Treydte, L. Andreu-Hayles, I. Dorado-Liñán, E. Gutierrez, G. Helle, M. Leuenberger, N.J. Loader, K.T. Rinne-Garmston, G.H. Schleser, S. Allen, J.S. Waterhouse, M. Saurer, M.M. Lehmann // *Science of The Total Environment*. – 2022. – V. 813. – 152281. URL: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152281> (дата обращения 07.12.2021).
13. France 670 Year Tree-Ring d18O Data and SPEI Drought Reconstruction <https://www.ncei.noaa.gov/pub/data/paleo/treering/isotope/europe/france/ang-font2016.txt> (дата обращения 07.12.2021).
14. Caterpillar. URL: <https://www.gistatgroup.com> (дата обращения 07.12.2021).

15. Саженкова Т.В., Пономарёв И.В., Пронь С.П. Методы анализа временных рядов. – Барнаул: Издво Алт. ун-та, 2020. – 60 с.
16. Зуев В.В., Бондаренко С.Л. Исследование озоносферы методами дендрохронологии. – Томск: Изд-во СО РАН, 2007. – 168 с.
17. Еланский Н.Ф. Российские исследования атмосферного озона и его предшественников в 2015–2018 гг. // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. – 2020. – Т. 56. – № 2. – С. 170–185.
18. Звягинцев А.М., Иванова Н.С., Кузнецова И.Н. Мониторинг общего содержания озона и УФ облученности: основные результаты // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. – 2017. – Т. 28. – № 6. – С. 85–98.
19. Голяндина Н.Э., Ломтев М.А. Улучшение разделимости временных рядов в анализе сингулярного спектра с помощью одного метода анализа независимых компонент // Вестник Санкт-Петербургского университета. Математика. Механика. Астрономия. – 2016. – Т. 3. – № 1. – С. 14–25.
20. Зуев В.В., Бондаренко С.Л., Устинова И.Г. Реконструкция изменений стратосферного озона в таёжной зоне на основе сингулярного спектрального анализа // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – № 3. – С. 174–183.
21. Зуев В.В., Бондаренко С.Л., Устинова И.Г. Особенности реконструкции изменений стратосферного озона вдоль уральского меридиана по дендрохронологическим данным // География и природные ресурсы. – 2022. – № 4. – С. 363–370.

REFERENCES

1. Bondarenko S.L., Savchuk D.A. Response of conifers to UV-B and climate in mountain areas. *Global Journal of Environmental Science and Management*, 2018, vol. 4, no. 3, pp. 299–314.
2. Golyandina N., Zhigljavsky A. *Singular spectrum analysis for time series*. New York, Springer, 2020. 146 p. Available at: <https://doi.org/10.1007/978-3-662-62436-4> (accessed 1 June 2023).
3. Kyznetsova V.V., Anikeeva M.V., Vrublevskaya V.I. Antifriction natural composite and its structure. *Works of BSTU*, 2017, no. 1 (192), pp. 125–134. In Rus. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/antifriktsionnyy-prirodnyy-kompozit-i-ego-stroenie> (accessed 1 June 2023).
4. Arefyev K.P., Bondarenko A.L., Bondarenko S.L., Leader A.M., Laptev R.S., Bordulev Yu.S., Mikhailov A.N. Positron spectroscopy of the woody structure of Siberian cedar pine. *Izvestia of higher educational institutions. Physics*, 2014, vol. 57, no. 11-2, pp. 261–265. In Rus.
5. Shishov V.V. *Vizualizatsiya i analiz dendroklimaticheskoy informatsii na osnove interaktivnoy sistemy dendroklimaticheskogo monitoringa*. Avtoreferat Dis. Dokt. nauk [Visualization and analysis of dendroclimatic information based on an interactive dendroclimatic monitoring system. Dr. Dis. Abstract]. Krasnoyarsk, 2009. 41 p.
6. Silkin P.P. *Metody mnogoparametricheskogo analiza struktury godichnykh kolets khvoynykh* [Methods of multiparametric analysis of the structure of annual coniferous rings]. Krasnoyarsk, Siberian Federal University Publ. House, 2010. 335 p.
7. Shiatov S.G., Vaganov E.A., Kirdyanov A.V., Kruglov V.B., Mazepa V.S., Naurzbayev M.M., Khantemirov R.M. *Metody dendrokronologii. Ch. 1: Osnovy dendrokronologii. Sbor i poluchenie drevesno-koltsevoy informatsii* [Methods of dendrochronology. P. 1: Fundamentals of dendrochronology. Collecting and receiving tree-ring information]. Krasnoyarsk, Krasnoyarsk State University Publ., 2000. 80 p.
8. Ryzhova N.V., Shutov V.V. *Fizika drevesiny* [Physics of wood]. Kostroma, KSTU Publ. house, 2009. 75 p.
9. *Index of /archive/Summaries/TotalOzone/Monthly_Means*. Available at: https://woudc.org/archive/Summaries/TotalOzone/Monthly_Means/ (accessed 7 December 2021).
10. *WSL Dendro Database*. Available at: <https://www.ncei.noaa.gov/access/paleo-search> (accessed 7 December 2021).
11. Stübi R., Schill H., Klausen J., Vuilleumier L., Grobner J., Egli L., Ruffieux D. On the compatibility of Brewer total column ozone measurements in two adjacent valleys (Arosa and Davos) in the Swiss Alps. *Meas. Tech.*, 2017, vol. 10, pp. 4479–4490. Available at: <https://doi.org/10.5194/amt-10-4479-2017> (accessed 7 December 2021).
12. Vitali V., Martínez-Sancho E., Treydte K., Andreu-Hayles L., Dorado-Liñán I., Gutierrez E., Helle G., Leuenberger M., Loader N.J., Rinne-Garmston K.T., Schleser G.H., Allen S., Waterhouse J.S., Saurer M., Lehmann M.M., The unknown third – Hydrogen isotopes in tree-ring cellulose across Europe. *Science of the Total Environment*, 2022, vol. 813. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152281> (accessed 1 June 2023).
13. *France 670 Year Tree-Ring d18O Data and SPEI Drought Reconstruction*. Available at: <https://www.ncei.noaa.gov/pub/data/paleo/treering/isotope/europe/france/ang-font2016.txt> (accessed 7 December 2021).
14. *Caterpillar*. Available at: <https://www.gistatgroup.com> (accessed 7 December 2021).
15. Sazhenkova T.V., Ponomarev I.V., Pron S.P. *Metody analiza vremennykh ryadov* [Methods of time series analysis]. Barnaul, Altai University Pub. house, 2020. 60 p.
16. Zuev V.V., Bondarenko S.L. *Issledovanie ozonosfery metodami dendrokronologii* [Study of the ozonosphere by dendrochronology methods]. Tomsk, SO RAN Publ., 2007. 168 p.
17. Elansky N.F. Russian studies of atmospheric ozone and its precursors in 2015–2018. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2020, vol. 56, no. 2, pp. 170–185. In Rus.
18. Zvyagintsev A.M., Ivanova N.S., Kuznetsova I.N., Nakhaev M.I., Nikiforova M.P. Monitoring of total ozone and UV irradiance: the main results. *Problems of ecological monitoring and ecosystem modeling*, 2017, vol. 28, no. 6, pp. 85–98. In Rus.
19. Golyandina N.E., Lomtev M.A. Improving of separability of time series in singular spectrum analysis using the method of independent component analysis. *Vestnik of the St. Petersburg University: Mathematics*, 2016, vol. 3, no. 1, pp. 14–25. In Rus.
20. Zuev V.V., Bondarenko S.L., Ustinova I.G. Reconstruction of changes in stratospheric ozone in the taiga forests based of the singular spectral analysis. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 3, pp. 174–183. In Rus.
21. Zuev V.V., Bondarenko S.L., Ustinova I.G. Features of the reconstruction of changes in stratospheric ozone along the ural meridian using dendrochronological data. *Geography and Natural Resources* [this link is disabled](#), 2022, vol. 43, no. 4, pp. 363–370. In Rus.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Владимир Владимирович Зуев, член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией геосферно-биосферных взаимодействий Института мониторинга климатических и экологических систем Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 634055, г. Томск, пр. Академический, 10/3. vzuev@list.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2351-8924>

Светлана Леонидовна Бондаренко, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории геосферно-биосферных взаимодействий Института мониторинга климатических и экологических систем Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 634055, г. Томск, пр. Академический, 10/3. bond_sl@inbox.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0751-2784>

Ирина Георгиевна Устинова, кандидат технических наук, доцент отделения Школы базовой инженерной подготовки Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. igu@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6005-5121>

Поступила в редакцию: 07.06.2023

Поступила после рецензирования: 13.11.2023

Принята к публикации: 30.11.2023

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Vladimir V. Zuev, RAS correspondent member, Dr. Sc., Professor, Head of the Laboratory of Geosphere-Biosphere Interactions, Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 10/3, Akademicheskyy avenue, Tomsk, 634055, Russian Federation. vzuev@list.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2351-8924>

Svetlana L. Bondarenko, Cand. Sc., Senior Researcher, Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 10/3, Akademicheskyy avenue, Tomsk, 634055, Russian Federation. bond_sl@inbox.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0751-2784>

Irina G. Ustinova, Cand. Sc., Associate Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. igu@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6005-5121>

Received: 07.06.2023

Revised: 13.11.2023

Accepted: 30.11.2023