

УДК 551.510:630*561.24

РЕКОНСТРУКЦИЯ ИЗМЕНЕНИЙ СТРАТОСФЕРНОГО ОЗОНА В ТАЁЖНОЙ ЗОНЕ НА ОСНОВЕ СИНГУЛЯРНОГО СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА

Зуев Владимир Владимирович¹,
vzuev@list.ru

Бондаренко Светлана Леонидовна¹,
bond_sl@inbox.ru

Устинова Ирина Георгиевна²,
igu@tpu.ru

¹ Институт мониторинга климатических и экологических систем Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 634055, г. Томск, пр. Академический, 10/3.

² Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Актуальность. Проблема снижения уровня стратосферного озона и интерес к его прошлым изменениям связаны с происходящим при этом увеличением дозы ультрафиолетовой радиации в коротковолновом диапазоне, достигающей поверхности Земли. Реконструкция и прогноз долгопериодных колебаний исследуемых параметров могут быть осуществлены при помощи метода множественной регрессии по данным плотности годовых колец хвойных. Чтобы расширить базу экспериментальных данных, проводятся поисковые работы по измерению новых характеристик годовых колец, а также уточняется математический аппарат методик предварительной обработки данных, анализируются связи биоиндикаторов с атмосферными параметрами, и разрабатываются новые модели их прогноза. Реконструкция исторических изменений атмосферных характеристик может быть рассмотрена в контексте перспективы искусственного восстановления лесных ресурсов.

Цель: рассмотреть методику реконструкции общего содержания озона на основе разработанной многокомпонентной сингулярной спектральной модели отклика древесины годовых колец хвойных на изменения атмосферных параметров.

Объекты. В течение сезона роста у деревьев формируется древесная структура годовых колец со свойствами композиционного материала. Каждая из компонент годового кольца: углеродсодержащая матрица, вода и углекислый газ, содержит отклики на изменения условий окружающей среды. На основе многокомпонентной модели суммарные отклики годовых колец, полученные при помощи программного обеспечения Caterpillar SSA 3.40, могут быть использованы для реконструкции изменений общего содержания озона в зонах с оптимальными условиями роста хвойных в отличие от зон с доминированием температурного фактора.

Методы: дендрохронологический метод; сингулярный спектральный анализ; эконометрические методы анализа временных рядов; интеллектуальный анализ данных; имитационное моделирование.

Результаты. Достоверность разработанной модели откликов годовых колец хвойных на изменения атмосферных параметров подтверждается на выборке эргодических хронологий компонент древесины. Критерий Дарбина–Уотсона позволяет выделить группу хронологий, в моделях которых отсутствует автокорреляция возмущений. Использование модели суммарных откликов для трех компонент древесины существенно повышает достоверность реконструкции исследуемых атмосферных параметров для таежной зоны с оптимальными условиями для годового прироста деревьев. Данные реконструкции общего содержания озона для таежной зоны Томского области позволяют сделать вывод, что, несмотря на рост уровня озона в стратосфере, изменения общего содержания озона не вернулись к своим средним историческим значениям, уровень УФ-В по-прежнему высок, но, тем не менее, территория и современный период являются благоприятными для лесопосадок.

Ключевые слова:

УФ-В радиация, температура воздуха, количество осадков, плотность годовых колец.

Введение

Таежная зона в широтах Западной Сибири представлена в основном сосной, елью, пихтой и кедром. Частые пожары, после которых тайга плохо восстанавливается, и значительные по объему вырубки деревьев в последние десятилетия сильно влияют на структуру лесов. Мероприятия по искусственному восстановлению лесов должны вестись более интенсивно и планомерно.

В работе [1] было исследовано значимое влияние атмосферного озона на процессы искусственного возобновления лесных ресурсов сибирской таежной зоны. Высаженные в открытый грунт саженцы нуждаются в серьезном уходе на протяжении 15–20 лет.

Долговременный прогноз условий роста саженцев важен, чтобы усилия при посадке деревьев не оказались безрезультатными.

Стратосферный озон поглощает всю солнечную радиацию на длинах волн короче 290 нм. Общее содержание озона в атмосфере (ОСО) – характеристика стратосферного озона. В диапазоне 290–315 нм, так называемом ультрафиолетовом излучении (УФВ), незначительная доля солнечной радиации достигает поверхности Земли. Действие УФВ на растительность и человека в целом негативное. Связь УФВ и ОСО оценивается высокой степенью обратной корреляции. Поэтому метод биоиндикации ОСО построен на анализе воздействия УФВ на растительность.

Биоиндикация и прогноз изменений ОСО имеют практическое значение для зональной оценки экологической ситуации и стратегии развития лесопромышленного комплекса. Так, экспериментально было установлено, что действие повышенных доз УФВ на саженцы благоприятно, поскольку уничтожает вредителей, мешающих росту неокрепших растений. Воздействие на метаболизм и годичный прирост деревьев оказывают климатические и географические факторы, ландшафт, а также гено- и фенотипическая изменчивость деревьев. Исследования показали, что отклики деревьев на изменения фактора УФВ проявляются в изменениях максимальной плотности годичных колец (maximum wood density (MXD)) и могут служить индикаторами изменений ОСО [2–4].

Долговременные изменения ОСО, начиная с 1970 г., можно оценить по данным спутниковых наблюдений [5]. Данные по ОСО в 2011 и 2016 гг. над различными регионами показывают, что в будущем вероятны аномалии близкие по уровню к озоновой депрессии 70-х гг. XX в. [6].

Повышение доз УФВ связано с глобальной проблемой резкого снижения уровня стратосферного озона в конце прошлого столетия. Моделирование воздействия озоноразрушающих веществ и парниковых газов на стратосферный озон неэффективно без учета нелинейных закономерностей исторических изменений атмосферных параметров, ОСО и CO_2 в том числе [7, 8].

Сингулярный спектральный анализ (ССА) представляет особый интерес для исследования нестационарных, коротких и зашумлённых рядов [9]. Это может быть множество аддитивных откликов деревьев

на абиотические факторы окружающей среды. Основная проблема вычисления компоненты известной природы заключается в правильной группировке компонент произвольного разложения временных рядов исследуемых характеристик. Программное обеспечение Caterpillar SSA 3.40 позволяет осуществить эту задачу [10].

Доля гармоник разложения MXD определяется количественным (%) содержанием каждой компоненты в годичном кольце в диапазоне значений, определенных экспериментально [11].

Статья посвящена исследованию откликов древесины годичного кольца хвойных деревьев на оптимальные для роста дерева условия и описанию многокомпонентной сингулярной спектральной модели (МССМ) откликов стволовой древесины на изменения ОСО в атмосфере. Чтобы опробовать алгоритм выделения из дендрохронологического сигнала композиционных составляющих материала годичных колец, была построена проверочная модель.

Реконструкция ОСО продолжительностью более 100 лет позволяет выявить длительные закономерности в изменениях ОСО. Спутниковые наблюдения в настоящее время продолжительностью 40 лет также позволяют оценить влияние атмосферных изменений на лесные ресурсы. Временное распределение ОСО меняется в течение суток, месяца и года в зависимости от широты и долготы. Для длительных прогнозов используют среднемесячные, сезонные и годовые изменения ОСО. На рис. 1 приведена иллюстрация распространения УФВ радиации на территории таежной зоны 56° – 66° с.ш. и 80° – 90° в.д.

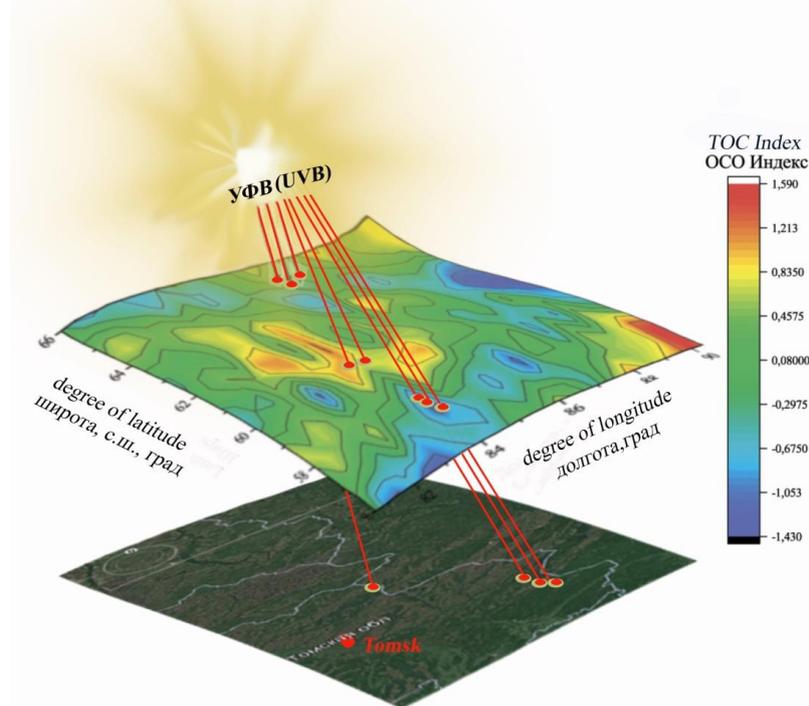


Рис. 1. Распространение УФВ радиации на территории таежной зоны 56° – 66° с.ш. 80° – 90° в.д. Средние значения ОСО за период с 1979 по 2020 г. (TEMIS)

Fig. 1. Spread of UV radiation in the taiga zone at 56° – 66° North latitude and 80° – 90° East longitude. Average total ozone content (TOC) values for the period from 1979 to 2020 (TEMIS)

Цель статьи – разработка методики реконструкции изменений ОСО в атмосфере на базе многокомпонентной сингулярной спектральной модели.

Методы

Обработка данных

Первый этап подготовки данных для реконструкции – стандартизация MXD – нивелирует особенности отдельных деревьев, усредняя данные по выборке [12]. Способности деревьев реагировать на изменения УФВ различаются: во-первых, у большей части хвойных деревьев возрастает плотность древесины, при этом корреляция ОСО и MXD будет отрицательная. Во-вторых, у некоторых деревьев усиливается движение питательных веществ: воды и сахаров, и тогда корреляция ОСО и MXD может быть положительной. Наконец, в-третьих, есть деревья, которые слабо реагируют на изменения ОСО, в этом случае корреляция отсутствует или незначима [4].

Анализируются данные: максимальной плотности годового кольца (MXD), общего содержания озона (ОСО), температуры воздуха (Т), количества осадков (Н) и их индексы. Нормирование показателей $Index(t)$ выполнялось по формуле (1), где $X(t)$ – показатель; $mean$ – среднее значение показателя; STD – среднее квадратичное отклонение.

$$Index(t) = [X(t) - mean] / STD. \quad (1)$$

В зависимости от высоких или низких температур воздуха, недостатка или избытка осадков негативное воздействие ОСО на годичный прирост хвойных может усилиться или исчезнуть.

Синергетическое воздействие условий окружающей среды на изменения максимальной плотности годового кольца $IndexMXD(t)$ оценить проще (формула 2), чем выделить отдельные отклики дерева на тот или иной фактор $IndexMXD_n(t)$ (формула 3).

По формуле (2) можно оценить отклики деревьев на доминирующий фактор воздействия.

$$IndexMXD(t) = \sum_{n=1}^m IndexMXD_{cca}(t), \quad (2)$$

где t – время, год; n – номер компоненты разложения хронологии плотности годичных на гармоники методом ССА [13]; m – число гармоник разложения в программе Caterpillar SSA 3.40 [14]. Суммарный эффект воздействия УФВ фактора оценивается по максимальному значению коэффициента корреляции ОСО и MXD.

В формуле (3) учитываются структурные изменения годового кольца. Сумма трех компонент равна дендрохронологическому сигналу плотности годичных колец.

$$IndexMXD(t) = \sum_{n=1}^3 \pm IndexMXD_n(t), \quad (3)$$

где t – время, год; n – номер компоненты разложения хронологии плотности годичных колец на структурные составляющие.

Знак в формуле (3) при суммировании определяется знаком коэффициента корреляции между ОСО и MXD.

Температурные ограничения прироста деревьев

Считается, что горная местность Ароза, Швейцария, относится к территориям, где температура воздуха в большинстве областей является лимитирующим фактором для роста хвойных деревьев. Первоначально для реконструкции ОСО использовались данные стандартных хронологий MXD. Обозначенные файлы можно найти на сайте [15]:

Swit102-104.std; Swit107-110.std; Swit140-143.std;
Swit 171-173.std; Swit 176.std.

Основное свойство выборки – синхронность годичных характеристик MXD и отрицательная связь с ОСО.

Значения коэффициентов корреляции усредненной MXD и среднемесячных значений с марта по сентябрь ОСО по данным обсерватории [16] и температуры по данным метеостанции [17] варьируются от 0,3 до 0,75. Отрицательные значения коэффициента корреляции указывают на то, что в деревьях запускается механизм, связанный с приростом годичных колец. В целом чувствительность усредненной MXD к изменениям ОСО малозаметно выше, чем к изменениям температуры. Корреляция MXD с осадками отсутствует.

Оптимальные условия роста деревьев

Изменения температуры и количества выпавших осадков [18] характеризуют лесную зону Сибирской равнины как зону с оптимальными условиями роста хвойных, синхронность данных при этом низкая [19]. Хотя рассчитанный по суммам Т и Н (с 1960 по 2010 гг.) гидротермический индекс (1,52) позволяет отнести исследуемую лесную территорию к зоне избыточного увлажнения почвы [20], такое соотношение влажности и температуры окружающей среды не отражается на годичном приросте хвойных или отражается очень редко [21]. Таким образом, к выбранной лесной зоне сложно применить дендрохронологическую методику в классическом виде. Так, керны – материал для измерений MXD – должны быть взяты у деревьев, прирост которых ограничивается тем или иным климатическим фактором, а также у деревьев, произрастающих в неблагоприятных и экстремальных условиях [22]. Условия сбора кернов сосны кедровой в окрестностях г. Томска не отвечают этим требованиям, поэтому данные измерений MXD, полученные П.П. Силкиным (ИЛ СО РАН) характеризуются отсутствием синхронности, особенно в последние 30 лет.

Многокомпонентная сингулярная спектральная модель отклика МССМ

Годичное кольцо формируется за счет различных метаболических процессов, связанных с условиями роста деревьев. В древесине годового кольца как в композиционном материале можно выделить три основные компоненты: углеродосодержащую матрицу, воду и углекислый газ. Рассмотрим выборку хронологий MXD сосны кедровой сибирской для лесной зоны около г. Томска. Фильтрация FFT сглаживанием двух

годовых колебаний [23] и индексирование данных – обязательное условие методики.

Программа Caterpillar SSA 3.40 [14] позволяет по графикам оценить разложения рядов MXD на отдельные гармоники и матрицы собственных векторов и реконструировать три основные компоненты древесины годичного кольца. Согласно эксперименту % объемного содержания компонент в древесине варьируется в разных диапазонах гармонических колебаний и представляет в сумме 100 % – дендрохронологический сигнал.

Таким образом, нормированная плотность годичных колец IndexMXD(t) равна сумме индексов основных компонент древесины:

$$\text{IndexMXD}(t) = \text{IC}(t) + \text{IH}_2\text{O}(t) + \text{ICO}_2(t) + \varepsilon,$$

где IC(t) характеризует содержание в годичных кольцах древесного вещества из углеродных соединений лигнина и целлюлозы; IH₂O(t) – содержание в годичных кольцах связанной воды и растворенной в ней углекислого газа, а также воды в полостях между волокнами древесины; ICO₂(t) – содержание в годичных кольцах CO₂ определяется объемом пустот в клетках древесины; ε – неучтенный % компонент. Экспериментальные измерения показали, что значения индексов объемного содержания варьируются в годичных кольцах для IC(t) в пределах 70–90 %, IH₂O(t) – 13–17 % и ICO₂(t) – 1,4–2,4 % [11].

Компоненты годичных колец, откликов в воде и углекислом газе IH₂O(t) и ICO₂(t) характеризуют метаболические процессы на клеточном уровне. У отдельных деревьев к выделенным климатическим откликам древесины могут добавляться шумовая и стохастические компоненты, представляющие собой высокочастотные колебания, связанные с изменениями в корневой системе, видовыми особенностями и др. После разложения на IC(t), IH₂O(t), ICO₂(t) шумовую и стохастическую компоненты можно убрать сглаживанием данных методом LOESS при помощи локальной регрессии с полосой 0,1 [23].

Проверочная модель для МССМ

Построим модель данных MXD y_t^f в момент времени t в виде суммы объемных долей составляющих композита. Экспериментально установлено соотношение объемного содержания компонент композита в момент времени t для древесного вещества x_t , воды z_t , углекислого газа k_t , и ξ_t – случайной помехи.

При правильном выборе % состава компонент с содержанием элементов, соответствующих экспериментальному [11], расчетные значения показателей b , c , d стремятся к единице.

Для решения поставленной задачи методом наименьших квадратов [24] исходим из условия:

$$Q = \sum_{i=1}^n (y_i - bx_i - cz_i - dk_i)^2 \Rightarrow \min_{b,c,d}.$$

Находим и приравниваем частные производные по b , c , d к нулю, и получаем тогда систему линейных уравнений:

$$\begin{cases} b \sum_{i=1}^n x_i^2 + c \sum_{i=1}^n x_i z_i + d \sum_{i=1}^n x_i k_i = \sum_{i=1}^n x_i y_i; \\ b \sum_{i=1}^n x_i z_i + c \sum_{i=1}^n z_i^2 + d \sum_{i=1}^n z_i k_i = \sum_{i=1}^n z_i y_i; \\ b \sum_{i=1}^n x_i k_i + c \sum_{i=1}^n z_i k_i + d \sum_{i=1}^n k_i^2 = \sum_{i=1}^n k_i y_i. \end{cases}$$

Решая систему, находим параметры b , c , d .

Проверка эргодичности выборки

При ограниченной численности выборки дендрохронологических данных и большом разнообразии откликов на изменения окружающей среды требуется оценить информативность выборки. Эргодичность временных рядов в некотором смысле является доказательством того, что рассматриваемая выборка данных может достоверно характеризовать исследуемый процесс.

Рассчитываются средние показатели точности прогноза:

$$\bar{S}_{abs} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^f - y_i^s,$$

где y_i^s – модельное значение средней относительной ошибки прогноза

$$\bar{S}_{отн} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{y_i^f - y_i^s}{y_i^f} \cdot 100 \%;$$

$\bar{S} < 10 \%$ – высокая точность; средняя абсолютная ошибка прогноза

$$\bar{S}_{abs sq} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i^f - y_i^s)^2}.$$

Коэффициент корреляции между исходными и модельными данными $R=1>0,7$ указывает на высокую точность модели.

Далее по статистике d , согласно критерию Дарбина–Уотсона, оценим автокорреляцию остатков рядов. Либо автокорреляция присутствует и в этом случае положительная, либо она отсутствует и отрицательная. Статистика критерия имеет вид:

$$d = \frac{\sum_{i=2}^n (e_i - e_{i-1})^2}{\sum_{i=1}^n e_i^2},$$

где $e_i = y_i^f - y_i^s$. Рассмотрим параметры, зависящие только от времени t . Зададим уровень значимости $\alpha=0,05$, число наблюдений $n=143$ и число независимых параметров модели $k=3$. По таблице значений критических точек критерия Дарбина–Уотсона находим нижнее и верхнее граничные значения критерия $d_L=1,613$ и $d_U=1,736$ [24].

Результаты

Проверка адекватности модели и эргодичности выборки

На рис. 2 показано на примере ряда B из выборки MXD хронологий, как соотносятся между собой компоненты годичных колец. Компоненты IC (76 %),

H_2O (15 %), ICO_2 (1,9 %) получены разложением хронологии MXD в программе Caterpillar SSA 3.40 на компоненты сингулярного спектра.

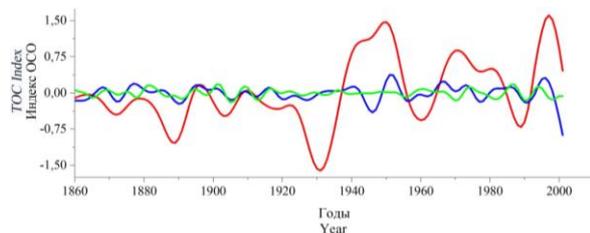


Рис. 2. Разложение одного из рядов MXD на компоненты сингулярным спектральным методом: красная линия IC – 76 %, синяя линия H_2O – 15 %, зеленая линия ICO_2 – 1,9 %; где % есть доля компоненты в дендрохронологическом сигнале

Fig. 2. Decomposition of one of the MXD series into components by the singular spectral method: the red line IC is 76 %, the blue line H_2O is 15 %, the green line ICO_2 is 1,9 %, where % is the proportion of the component in the dendrochronological signal

Рассмотрим данные хронологий В–J. Найдем выборочное среднее и выборочную дисперсию для каждого ряда. Процесс является эргодическим, если одновременно выполняются два условия (равенство выборочных средних и выборочных дисперсий). Согласно критерию Дарбина–Уотсона $d_U < d < d_L = 2,264$, это значит, что автокорреляции в остатках отсутствуют и что модель качественная [24].

В табл. 1, 2 приведены результаты проверки адекватности модели и эргодичности выборки. В табл. 1 жирным шрифтом выделены строки, автокорреляция остатков модели в которых попадает в зону неопределенности. Временные ряды с такими характеристиками не были включены в выборку для расчета суммарного отклика.

Из табл. 2 следует, что семь значений выборочного среднего выборочной дисперсии практически совпадают между собой с незначительной погрешностью. Таким образом, в рассматриваемом случае оба условия выполняются, поэтому процесс является эргодическим: выборочное среднее по ансамблю $= -8,1\text{E}-08 \approx 0$, а выборочная дисперсия по ансамблю равна ≈ 1 .

Таблица 1. Проверочная модель ряда и ее качество

Table 1. Test model of the series and its quality

№ ряда	Модель/Model	\bar{S}_{abs}	$\bar{S}_{отн}, \%$	\bar{S}_{absq}	R	d
B	$y_i = 0,999x_i + 1,000z_i + 1,000k_i$	0,0004	4,48	0,0005	1	2,110
C	$y_i = 0,999x_i + 1,000z_i + 1,000k_i$	0,0004	0,15	0,0005	1	1,816
D	$y_i = 1,000x_i + 1,000z_i + 1,000k_i$	0,0004	0,13	0,0005	1	2,162
E	$y_i = 1,000x_i + 1,000z_i + 0,999k_i$	0,0004	0,21	0,0005	1	1,727
F	$y_i = 0,999x_i + 0,999z_i + 0,999k_i$	0,0004	0,15	0,0005	1	1,987
G	$y_i = 0,999x_i + 0,999z_i + 1,000k_i$	0,0004	0,02	0,0005	1	1,889
H	$y_i = 0,999x_i + 1,000z_i + 0,999k_i$	0,0004	0,11	0,0005	1	1,732
I	$y_i = 0,999x_i + 1,000z_i + 1,000k_i$	0,0004	0,15	0,0005	1	1,999
J	$y_i = 1,000x_i + 0,999z_i + 0,999k_i$	0,0004	0,91	0,0005	1	1,853

\bar{S}_{abs} – показатель точности прогноза; $\bar{S}_{отн}$ – относительная ошибка прогноза; \bar{S}_{absq} – абсолютная ошибка прогноза; R – коэффициент корреляции между исходными и модельными данными; d – статистика критерия Дарбина–Уотсона.

\bar{S}_{abs} is the indicator of forecast accuracy; $\bar{S}_{отн}$ is the relative forecast error; \bar{S}_{absq} is the absolute forecast error; R is the correlation coefficient between the initial and model data; d is the Durbin–Watson statistic.

Таблица 2. Проверка эргодичности. Средние значения выборки данных \bar{x}_b при дисперсии $D_b = 1,0$ для территории Томской области, Западная Сибирь

Table 2. Ergodicity check. The average values of the data sample \bar{x}_b with the variance $D_b = 1,0$ for the territory of the Tomsk region, Western Siberia

№ ряда	B	C	D	F	G	I	J
\bar{x}_b	-6,5E-7	2,19E-7	-2,8E-7	-4,9E-7	3,5E-7	-2,1E-7	-1,7E-7

Реконструкция ОСО в зонах с лимитирующим годичный прирост фактором

Хронология-индикатор получена усреднением стандартных MXD и фильтрацией низкочастотных составляющих. Корреляция плотности годичных колец и изменений ОСО составила $R = -0,63$ при вероятностном уровне $p < 0,001$.

На рис. 3 приведена реконструкция ОСО по регрессионной модели с коэффициентом детерминации $R^2 = 0,55$ и критерием Фишера $F = 39,4$. Результаты верификации с 1967 по 1932 гг. по данным калибровоч-

ного периода с 1998 по 1968 гг. подтверждают возможность использования для реконструкции ОСО более коротких данных спутниковых наблюдений.

В реконструкции ОСО наблюдаются циклические закономерности с периодами колебаний 5, 7, 11, 14, 22, 49 лет.

Реконструкция ОСО в зонах с оптимальными условиями для годичного прироста

Рассматривалась выборка MXD хронологий для 9 деревьев сосны кедровой, произрастающих на территории Томской области (Западная Сибирь).

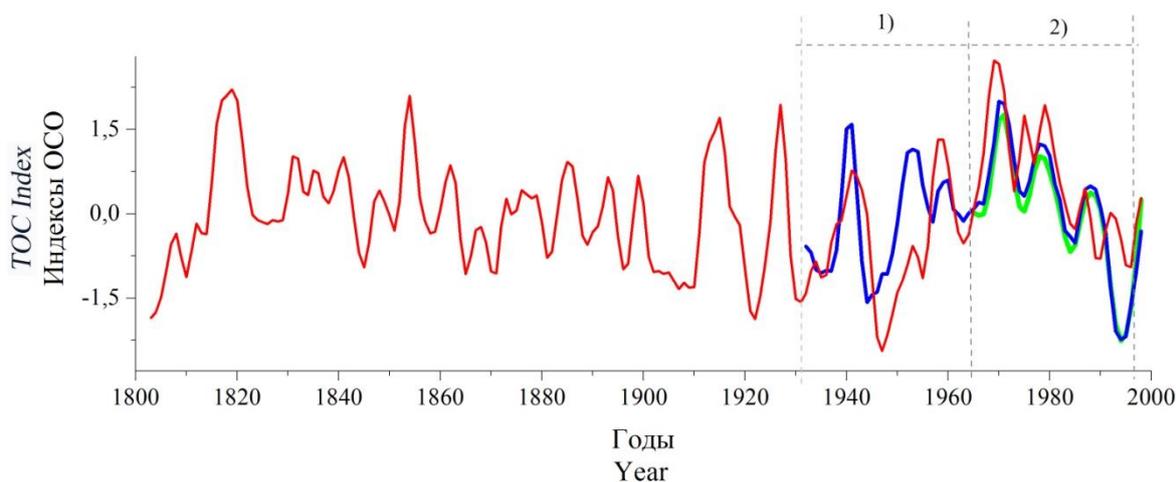


Рис. 3. Реконструкция ОСО (красная линия), ряд инструментальных наблюдений ОСО (синяя линия) и верификация (2) реконструкции (зеленая линия) по учебной выборке (1) для Ароза, Швейцария

Fig. 3. Reconstruction of the TOC (red line), a series of instrumental observations of the TOC (blue line) and verification (2) of the reconstruction (green line) of the training sample (1) for Arosa, Switzerland

На проверочной модели была оценена достоверность разложения хронологий на компоненты $IC(t)$, $IH_2O(t)$, $ICO_2(t)$. Все расчетные коэффициенты оказались близкими к единице. Но по автокорреляции остатков разложения две хронологии MXD попадали в зону неопределенности. Эти данные были исключены из исследуемой выборки.

Корреляционный анализ связей среднемесячных значений ОСО с рядами $IC(t)$, $IH_2O(t)$ показал присутствие значимых положительных и отрицательных откликов. Корреляция компонент $ICO_2(t)$ и ОСО наблюдалась только в сентябре предыдущего года. По результатам корреляционного анализа, приведен-

ного в табл. 3, был найден суммарный отклик $\Sigma IndexMXD(t) = P1(t) + P2(t) + P3(t)$, где

$$P1(t) = \frac{-b1(t) - c1(t) + d1(t) + f1(t) + g1(t) - j1(t)}{6},$$

$$P2(t) = \frac{-c2(t) + d2(t) + f2(t) + g2(t) + j2(t)}{5},$$

$$P3(t) = \frac{c3(t) + d3(t) - g3(t) + j(t)}{4},$$

где $P1-P3$ – отклики по компонентам, чувствительным к ОСО, у хронологии $B(t)$, ее элементы обозначены $b1(t)$, $b2(t)$ и $b3(t)$, обозначения для других хронологий аналогичные.

Таблица 3. Корреляционный анализ средних изменений ОСО, температуры (Т), осадков (Н) и MXD-компонент древесины годовых колец 1 – $IC(t)$, 2 – $IH_2O(t)$, 3 – $ICO_2(t)$, * – отсутствие корреляции

Table 3. Correlation analysis of average changes in TOC, temperature (T), precipitation (H) and MXD components of the wood of annual rings 1 – $IC(t)$, 2 – $IH_2O(t)$, 3 – $ICO_2(t)$, * – no correlation

	P1 (76–92 % MXD)			P2 (12–14 % MXD)			P3 (1–3 % MXD)		
	ОСО (апрель–сентябрь) April–September	Т	Н	ОСО	Т	Н	ОСО (сентябрь) September	Т	Н
<i>B</i>	–0,5	0,4	*	*	–0,5	*	*	–0,6	0,8
<i>C</i>	–0,8	0,8	*	–0,6	0,7	*	0,7	*	*
<i>D</i>	0,9	–0,5	*	0,8	–0,6	*	0,5	0,6	–0,8
<i>E</i>	автокорреляция остатков проверочной модели попадает в зону неопределенности autocorrelation of the remnants of the verification model falls into the zone of uncertainty								
<i>F</i>	0,9	–0,7	*	0,5	–0,5	*	*	*	*
<i>G</i>	0,7	*	*	0,3	*	*	–0,7	–0,6	0,8
<i>H</i>	автокорреляция остатков проверочной модели попадает в зону неопределенности autocorrelation of the remnants of the verification model falls into the zone of uncertainty								
<i>I</i>		0,4	–0,3	*	*	*	*	*	0,3
<i>J</i>	–0,7	*	*	0,7	*	*	0,7	*	*

Регрессионная модель реконструкции изменений атмосферного озона по суммарному отклику МССМ годовых колец характеризуется коэффициентом корреляции $R=0,96$ при сдвиге рядов относительно друг друга 1 год (без сдвига $R=0,91$), коэффициентом детерминации $R^2=0,91$ и критерием Фишера $F=240,1$ (рис. 4).

Наличие в древесно-кольцевых хронологиях циклических колебаний разных порядков является показателем биологической устойчивости древостоев, так как свидетельствует о приспособляемости деревьев к смене климатических условий. По годовичным кольцам реконструирована цикличность колебаний ОСО, индуцированная солнечной активностью и сменой кли-

матических эпох. В реконструкции ОСО наблюдаются циклические закономерности с периодами колебаний 5, 7, 11, 14, 22, 33, 52 года.

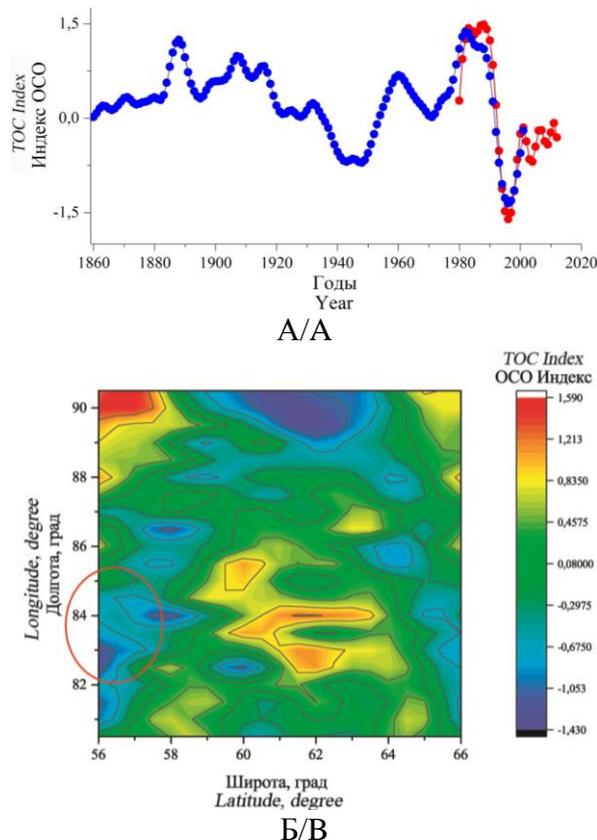


Рис. 4. (А) Временные ряды реконструированных (синий цвет) и инструментальных среднемесячных с апреля по сентябрь данных ОСО (красный цвет) для Томской области Западной Сибири; (Б) Пространственно-временное распределение ОСО для зоны 56°–66° с.ш. и 80°–90° в.д. по данным спутникового зондирования. Средние значения ОСО за период с 1979 по 2020 гг. опубликованы на [5]. Окружностью выделена зона Томского района

Fig. 4. (A) Time series of reconstructed (blue color) and instrumental monthly average from April to September TOC data (red color) for the Tomsk region of Western Siberia; (B) The spatial-temporal distribution of the TOC for the zone of 56°–66° North latitude and 80°–90° East longitude according to satellite sensing data. The average TOC values for the period from 1979 to 2020 are published on [5]. The circle marks the area of the Tomsk district

Несмотря современную тенденцию роста уровня озона в стратосфере, изменения ОСО не вернулись к

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зонирование территории для целей лесовосстановления по изменениям общего содержания озона в атмосфере (на примере Томской области) / В.В. Зуев, С.Л. Бондаренко, Д.А. Савчук, А.Ю. Бочаров // География и природные ресурсы. – 2009. – № 3. – С. 42–47.
2. Роль крупных вулканических извержений в разрушении стратосферного озона и деградации хвойных лесов / В.В. Зуев, Н.Е. Зуева, Е.С. Савельева, Е.М. Короткова, А.В. Павлинский // Оптика атмосферы и океана. – 2022. – Т. 35. – № 2. – С. 150–154.

своим средним историческим значениям, уровень УФ-В по-прежнему высок, отдельные районы по-прежнему являются благоприятными для высадки саженцев, в частности Томский район, выделенный на рис. 4, б красной окружностью.

Заключение

Характеристики реконструкций ОСО, выполненных для различных лесных зон по разным методикам, демонстрируют высокую достоверность и долгопериодные колебания. Достоверность реконструкции ОСО на основе МССМ заметно выше. В этом случае реконструкция выполнена по сумме откликов деревьев в сформированных за период сезонного роста основных составляющих древесины годичного кольца. Расчет статистических характеристик Дарбина–Уотсона помогает сформировать выборку временных рядов – эргодических биоиндикаторов, характеристики которых отражают изменения в атмосфере.

До настоящего времени изменения в кольце рассматривались либо на уровне всего кольца, либо на клеточном уровне. Вместе с тем древесина – это природный полимерный композит, химические компоненты которого можно рассматривать на уровне молекулярных соединений углерода С (твердотельная компонента), свободной и связанной воды (жидкая компонента) и газовой компонента, заполненной в основном CO₂. Выделение структурных компонент для многокомпонентной модели стало возможным после экспериментальных измерений % содержания древесной, водной и газообразной составляющих древесины в годичном кольце.

В дальнейшем использование модели МССМ может быть расширено, число компонент увеличено. Так, в зависимости от вида сосны различают деревья с большим количеством смолы в смоляных ходах. Число рассматриваемых компонент для таких деревьев может быть увеличено до 4. В настоящее время при измерениях MXD рентгенографическим методом смола экстрагируется из ядер и годичные изменения в ней не учитываются.

Разработанная биоиндикационная методика на базе МССМ наиболее эффективна для реконструкции атмосферных параметров для лесных зон с оптимальными условиями ежегодного прироста деревьев. Данные реконструкции ОСО для таежной зоны Томской области могут быть использованы для прогноза и рекомендаций по лесохозяйственной политике.

Исследование выполнено в рамках госбюджетной темы № 121031300156-5.

3. Nassour R., Ayash A. Effects of ultraviolet-B radiation in plant physiology // Agriculture (Pol'nohospodárstvo). – 2021. – V. 67. – P. 1–15.
4. 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.
5. TEMIS. URL: <http://temis.nl> (дата обращения 15.02.2022).
6. Еланский Н.Ф. Российские исследования атмосферного озона и его предшественников в 2015–2018 гг. // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. – 2020. – Т. 56. – № 2. – С. 170–185.

7. Detectability of the impacts of ozone-depleting substances and greenhouse gases upon stratospheric ozone accounting for nonlinearities in historical forcings / J. Bandoro, S. Solomon, B.D. Santer, D.E. Kinnison, M.J. Mills // *Atmos. Chem. Phys.* – 2018. – V. 18. – № 1. – P. 143–166.
8. Chiodo G., Polvani L.M. The response of the ozone layer to quadrupled CO₂ concentrations: implications for climate // *Journal of climate.* – 2020. – V. 32. – P. 7639–7642.
9. Абалов Н.В., Губарев В.В. Автоматическая группировка компонент разложения временного ряда при сингулярном спектральном анализе // *Труды СПИИРАН.* – 2015. – Вып. 43. – С. 68–82.
10. Golyandina N., Zhigljavsky A. Singular spectrum analysis for time series. *SpringerBriefs in Statistics.* – Berlin Heidelberg: Springer Nature, 2020. – 146 p.
11. 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.
12. Тишин Д.В., Чижикова Н.А. Дендрохронология. – Казань: Казанский университет, 2018. – 34 с.
13. Зуев В.В., Бондаренко С.Л. Исследование озоносферы методами дендрохронологии. – Томск: Изд-во СО РАН, 2007. – 168 с.
14. Caterpillar. URL: <https://www.gistatgroup.com> (дата обращения 15.02.2022).
15. WSL Dendro Database. URL: <https://www.ncei.noaa.gov/access/paleo-search> (дата обращения 15.02.2022).
16. 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 15.02.2022).
17. Begert M., Schlegel T., Kirchhofer W. Homogeneous temperature and precipitation series of Switzerland from 1864 to 2000 // *Int. J. Climatol.* – 2005. – V. 25. – P. 65–80. URL: <https://doi.org/10.1002/joc.1118> (дата обращения 15.02.2022).
18. Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. URL: <http://meteo.ru/data> (дата обращения 15.02.2022).
19. Маркелова А.Н., Николаева С.А., Тартаковский В.А. Совместная фильтрация древесно-кольцевых хронологий *Pinus sylvestris* L., произрастающей в оптимальных условиях // *Journal of Siberian Federal University. Biology.* – 2012. – № 1. – P. 13–26.
20. Поляков Д.В., Кужевская И.В. Применение кластерного анализа для оценки температурно-влажностных условий в период активной вегетации на территории юга Западной Сибири и его связь с гидротермическим коэффициентом Т. Г. Селянинова // *Вестн. Том. гос. ун-та.* – 2012. – № 360. – С. 188–192.
21. Велисевич С.Н., Хуторной О.В. Влияние климатических факторов на радиальный рост кедра и лиственницы в экотопах с различной влажностью почвы на юге Западной Сибири // *Журнал Сибирского Федерального университета. Биология.* – 2009. – Т. 2. – № 1. – С. 117–132.
22. 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. Наурызбаев, Р.М. Хантемиров. – Красноярск: Краснояр. гос. ун-т, 2000. – 80 с.
23. OriginLab. URL: <https://originlab.com> (дата обращения 15.02.2022).
24. Елисеева И.И. Эконометрика. – М.: Изд-во «Юрайт», 2018. – 449 с.

Поступила 09.03.2022 г.

Информация об авторах

Зуев В.В., член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией геосферно-биосферных взаимодействий Института мониторинга климатических и экологических систем Сибирского отделения Российской академии наук.

Бондаренко С.Л., кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории геосферно-биосферных взаимодействий Института мониторинга климатических и экологических систем Сибирского отделения Российской академии наук.

Устинова И.Г., кандидат технических наук, доцент Школы базовой инженерной подготовки Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 551.510:630*561.24

RECONSTRUCTION OF CHANGES IN STRATOSPHERIC OZONE IN THE TAIGA FORESTS BASED OF THE SINGULAR SPECTRAL ANALYSIS

Vladimir V. Zuev¹,
vzuev@list.ru

Svetlana L. Bondarenko¹,
bond_sl@inbox.ru

Irina G. Ustinova²,
igu@tpu.ru

¹ Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 10/3, Akademicheskoy avenue, Tomsk, 634055, Russia.

² National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

The relevance. The problem of reducing the level of stratospheric ozone and the interest in its past changes are associated with the increase in the dose of ultraviolet radiation in the short-wave range reaching the Earth's surface. Reconstruction and prediction of long-period fluctuations of the studied parameters can be carried out using the method of multiple regression according to the density of annual growth rings of conifers. In order to expand the experimental data base, exploratory work is being carried out to measure new characteristics of annual growth rings, as well as the mathematical apparatus of data preprocessing techniques is being refined, the connections of bioindicators with atmospheric parameters are being analyzed and new models of their prediction are being developed. Reconstruction of historical changes in atmospheric characteristics can be considered in the context of the prospect of artificial restoration of forest resources. **The aim** of the research is to discuss a technique for reconstructing the total ozone content based on a multicomponent singular spectral model of the response of conifers annual growth rings.

Objects. During the growing season, trees form a woody structure of annual growth rings with the properties of a composite material. Each of the components of the annual growth rings such as a carbon-containing matrix, water and carbon dioxide contains responses to changes in environmental conditions. On the basis of a multicomponent model, the total responses of annual rings obtained using the Caterpillar SSA 3.40 software can be used to reconstruct changes in the total ozone content in zones with optimal coniferous growth conditions, as opposed to zones with dominance of the temperature factor.

Methods: dendrochronological method; singular spectral analysis; econometric methods of time series analysis; data mining; simulation modeling.

Results. The reliability of the model of responses of coniferous annual growth rings to changes in atmospheric parameters is confirmed by a sample of ergodic chronologies of wood components. The Durbin–Watson statistic makes it possible to identify a group of chronologies in whose models there is no autocorrelation of perturbations. The use of the cumulative response model for three wood components significantly increases the reliability of the reconstruction of the studied atmospheric parameters for the taiga zone with optimal conditions for annual tree growth. The data of the reconstruction of the total ozone content for the taiga zone of the Tomsk region allow us to conclude that despite the increase in the ozone level in the stratosphere, the changes in the total ozone content have not returned to their average historical values, the level of UV-B is still high, but nevertheless the territory and the modern period are favorable for forest plantations.

Key words:

Ultraviolet B radiation, air temperature, amount of precipitation, wood density, annual rings.

The research was carried out within the State Budgetary topic no. 121031300156-5.

REFERENCES

- Zuev V.V., Bondarenko S.L., Savchuk D.A., Bocharov A.Yu. Zonirovanie territorii dlya tseley lesovosstanovleniya po izmeneniyam obshchego soderzhaniya ozona v atmosfere (na primere Tomskoy oblasti) [Zoning of the territory for the purposes of reforestation based on changes in the total ozone content in the atmosphere (on the example of the Tomsk region)]. *Geografiya i prirodnye resursy*, 2009, no. 3, pp. 42–47.
- Zuev V.V., Zueva N.E., Savel'yeva E.S., Korotkova E.M., Pavlinsky A.V. The role of large volcanic eruptions in stratospheric ozone depletion and degradation of coniferous forests. *Atmospheric and Oceanic Optics*, 2022, vol. 35, no. 2, pp. 150–154. In Rus.
- Nassour R., Ayash A. Effects of ultraviolet-B radiation in plant physiology. *Agriculture (Pol'nohospodarstvo)*, 2021, vol. 67, pp. 1–15.
- 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.
- TEMIS. Available at: <http://temis.nl> (accessed 15 February 2022).
- Elansky N.F. Russian studies of atmospheric ozone and its precursors in 2015–2018. *Izv. Physics of atmosphere and ocean*, 2020, vol. 56, no. 2, pp. 170–185. In Rus.
- Bandoro J., Solomon S., Santer B.D., Kinnison D.E., Mills M.J. Detectability of the impacts of ozone-depleting substances and greenhouse gases upon stratospheric ozone accounting for nonlinearities in historical forcings. *Atmos. Chem. Phys.*, 2018, vol. 18, no. 1, pp. 143–166.
- Chiodo G., Polvani L.M. The response of the ozone layer to quadrupled CO₂ concentrations: implications for climate. *Journal of climate*, 2020, vol. 32, pp. 7639–7642.
- Abalov N.V., Gubarev V.V. Avtomaticheskaya gruppировка komponent razlozheniya vremennogo ryada pri singulyarnom spektralnom analize [Automatic grouping of time series decomposition components in singular spectral analysis]. *Trudy SPIRAN*, 2015, no. 43, pp. 68–82.
- Golyandina N., Zhigljavsky A. *Singular Spectrum Analysis for Time Series*. Berlin Heidelberg, Springer Nature, 2020. 146 p.

11. 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. *Russian Physics Journal*, 2014, vol. 57, no. 11-2, pp. 261–265. In Rus.
12. Tishin D.V., Chizhikova N.A. *Dendrokronologiya* [Dendrochronology]. Kazan, Kazan University Publ., 2018. 34 p.
13. Zuev V.V., Bondarenko S.L. *Issledovanie ozonosfery metodami dendrokronologii* [Study of the ozonosphere by dendrochronology methods]. Tomsk, SO RAN Publ., 2007. 168 p.
14. *Caterpillar*. Available at: <https://www.gistatgroup.com> (accessed 15 February 2022).
15. *WSL Dendro Database*. Available at: <https://www.ncei.noaa.gov/access/paleo-search> (accessed 15 February 2022).
16. 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 15 February 2022).
17. Begert M., Schlegel T., Kirchhofer W. Homogeneous temperature and precipitation series of Switzerland from 1864 to 2000. *Int. J. Climatol.*, 2005, vol. 25, pp. 65–80. Available at: <https://doi.org/10.1002/joc.1118> (accessed 15 February 2022).
18. *Federalnaya sluzhba po gidrometeorologii i monitoringu okruzhayushchey sredy* [Federal service in hydrometeorology and monitoring of environment]. Available at: <http://meteo.ru/data> (accessed 15 February 2022).
19. Markelova A.N., Nikolaeva S.A., Tartakovskiy V.A. Joint filtration of tree-ring chronologies of *Pinus sylvestris* L. growing in optimal conditions. *Journal of Siberian Federal University. Biology*, 2012, no. 1, pp. 13–26. In Rus.
20. Polyakov D.V., Kuzhevskaya I.V. Primenenie klaster'nogo analiza dlya otsenki temperaturno-vlazhnostnykh usloviy v period aktivnoy vegetatsii na territorii yuga Zapadnoy Sibiri i ego svyaz s gidrotermicheskim koeffitsientom T.G. Selyaninova [Application of cluster analysis to assess temperature and humidity conditions during active vegetation in the South of Western Siberia and its relationship with the hydrothermal coefficient of T. G. Selyaninov]. *Vestn. Tom. gos. un-ta*, 2012, no. 360, pp. 188–192.
21. Velisevich S.N., Khutornoy O.V. Vliyanie klimaticheskikh faktorov na radialny rost kedra i listvennitsy v ekotopakh s razlichnoy vlazhnostyu pochvy na yuge Zapadnoy Sibiri [The influence of climatic factors on the radial growth of cedar and larch in ecotopes with different soil moisture in the south of Western Siberia]. *Zhurnal Sibirskogo Federalnogo universiteta. Biologiya*, 2009, vol. 2, no. 1, pp. 117–132.
22. Shiyatov S.G., Vaganov E.A., Kirdeyanov A.V., Kruglov V.B., Mazepa V.S., Naurzbaev 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.
23. *OriginLab*. Available at: <https://originlab.com> (accessed 15 February 2022).

Received: 9 March 2022.

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.

Svetlana L. Bondarenko, Cand. Sc., senior researcher, Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

Irina G. Ustinova, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.