

УДК 551.510:630*561.24

DOI: 10.15372/GIPR20220410

В.В. ЗУЕВ*, С.Л. БОНДАРЕНКО*, И.Г. УСТИНОВА***Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН,
634055, Томск, пр. Академический, 10/3, Россия, vzuev@list.ru, bond_sl@inbox.ru**Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
634050, Томск, пр. Ленина, 30, Россия, igu@tpu.ru**ОСОБЕННОСТИ РЕКОНСТРУКЦИИ ИЗМЕНЕНИЙ СТРАТОСФЕРНОГО ОЗОНА
ВДОЛЬ УРАЛЬСКОГО МЕРИДИАНА ПО ДЕНДРОХРОНОЛОГИЧЕСКИМ ДАННЫМ**

Анализ данных плотности годовичных колец хвойных в периоды 1979–1993 и 1979–2006 гг. позволяет выявить закономерности в отклике деревьев на изменения условий окружающей среды с учетом процессов аномального снижения и естественного восстановления общего содержания озона. Реконструкции изменений общего содержания озона за последние 300 лет вдоль уральского меридиана по данным спутникового мониторинга общего содержания озона TEMIS (проект Tropospheric Emission Monitoring Internet Service) и откликам стволовой древесины, определенным по данным максимальной плотности годовичных колец сосны, ели и лиственницы, были выполнены на основе методов дендрохронологического и спектрального сингулярного анализа, что позволило сопоставить картины нынешнего и прошлого состояния полей стратосферного озона. Хотя изменения стратосферного озона могут выступать в роли фактора, существенно ограничивающего годичный прирост древесины, такой подход к оценкам возможен только при наложении реакций деревьев под воздействием ультрафиолетовой радиации в спектральном диапазоне 280–315 нм на стрессовые реакции от других климатических факторов. По результатам численного моделирования для трех диапазонов широт были рассчитаны модели максимальной плотности годовичных колец в зависимости от изменений общего содержания озона и приведены реконструкции прошлых изменений. Засушливость климата и его цикличность усиливают связанное с увеличением солнечной радиации стрессовое воздействие озоносферы на растительность и позволяют разделить отклики деревьев по стрессорам статистическими методами. Реконструкции общего содержания озона с апреля по сентябрь для уральского меридиана показывают, что уровень общего содержания озона еще не достиг прежних исторических значений.

Ключевые слова: УФ-В-радиация, общее содержание озона, температура воздуха, количество осадков, плотность годовичных колец, интеллектуальный анализ.

V.V. ZUEV*, S.L. BONDARENKO*, I.G. USTINOVA***Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems, Siberian Branch,
Russian Academy of Sciences, 634055, Tomsk, pr. Akademicheskii, 10/3, Russia,
vzuev@list.ru, bond_sl@inbox.ru**National Research Tomsk Polytechnic University,
634050, Tomsk, pr. Lenina, 30, Russia, igu@tpu.ru**FEATURES OF RECONSTRUCTION OF CHANGES IN STRATOSPHERIC OZONE ALONG
THE URAL MERIDIAN USING DENDROCHRONOLOGICAL DATA**

Analysis of data on the density of annual rings of conifers for the periods 1979–1993 and 1979–2006 allows us to identify patterns in the response of trees, taking into account the processes of abnormal decrease and natural recovery of total ozone content. Reconstructions of changes in total ozone content over the past 300 years along the Ural meridian according to satellite monitoring of total ozone content TEMIS (Tropospheric Emission Monitoring Internet Service project) and stem wood responses observed in data on the maximum density of annual rings of pine, spruce and larch were performed on the basis of methods of dendrochronological and spectral singular analysis, which made it possible to compare the current and past state of stratospheric ozone fields. Although changes in stratospheric ozone can play the role of a factor significantly limiting the annual growth of wood, such an approach to estimates works only in conditions of overlapping responses of trees under UV-B effects in the spectral range of 280–315 nm on stress responses from other climatic factors. Based on the results of a numerical modeling for three latitude ranges, models of maximum annual density were calculated in terms of changes in total ozone content and reconstructions of their past changes were given. The aridity of the climate and its cyclicity increase the stress effect of the ozonosphere

on vegetation associated with an increase in UV-B radiation, and allow us to differentiate the responses of trees according to stressors by statistical methods. Reconstructions of total ozone content from April to September for the Ural meridian show that the level of total ozone content has not yet reached the previous historical values.

Keywords: *UV-B radiation, total ozone content, air temperature, precipitation amount, density of annual rings, data mining.*

ВВЕДЕНИЕ

Озоновый слой от 15 до 30 км, в котором находится до 75 % озона в атмосфере, защищает Землю от вредного воздействия ультрафиолетовой (УФ) радиации в спектральном диапазоне 280–315 нм (диапазон *B*) — УФ-*B*-радиации. Многочисленные исследования показывают, что уменьшение общего содержания озона (ОСО) в озоновом слое, приводит к значительному росту поражений живых организмов и уменьшению продуктивности растений. Развитие спутникового мониторинга озоносферы способствовало применению сведений об ОСО в моделировании и контроле климатических процессов. Ряды спутниковых наблюдений за ОСО в настоящее время охватывают период более 40 лет. Различные исследования показали, что для озонового слоя характерны реакции на стратосферные потепления, геомагнитные бури и солнечные протонные события; имеется зависимость реакции ОСО на эти возмущения от широты, долготы, типа каждого возмущения и фазы квазидвухлетнего колебания стратосферных ветров над экватором [1, 2]. Современные представления об изменениях климата связаны с его цикличностью, солнечной активностью и другими планетарными закономерностями [3, 4].

В настоящее время для проведения анализа и реконструкции содержания стратосферного озона по данным инструментальных измерений при помощи химико-климатических моделей [5] распространение получил биоиндикационный метод реконструкции прошлых изменений ОСО и УФ-*B*-радиации по функции откликов годичных колец или следам пыльцы деревьев в слоях отдельных видов мхов [6]. Метод реконструкции ОСО основан на свойстве деревьев компенсировать стрессовое воздействие УФ-*B*-излучения за счет изменений плотности годичных колец (MXD). Процесс формирования отклика у деревьев даже на незначительные изменения ОСО многоступенчатый и связан с климатическими и географическими особенностями роста деревьев [7].

Выделение отклика стволной древесины на изменения ОСО и уровня УФ-*B*-радиации было рассмотрено по наиболее доступному источнику информации — спутниковым данным [8, 9]. В дальнейшем методика была видоизменена с целью повышения достоверности результатов реконструкции и с учетом условий произрастания деревьев.

Для выявления стрессовых факторов применялся анализ географических условий (горная местность, низменность и др.) в сочетании с оценкой засушливости климата, определяемой по индексу де Мортонна [10]. Интерес к этому показателю спустя столетие после введения в европейские методики оценки климата обусловлен повсеместным ростом температуры окружающей среды на фоне снижения среднемесячного количества осадков, характерных для современной эпохи [11].

Обнаружение функции отклика стволной древесины методом сингулярного спектрального анализа на основе выделения структурных компонентов древесины годичных колец позволяет реконструировать ОСО по максимальной плотности MXD для деревьев, растущих в оптимальных условиях [12–14].

Над уральским меридианом возможно образование зон с аномально низким уровнем ОСО [15]. Так, в 2016 г. на севере Урала была зарегистрирована «миницыра» — самое низкое общее содержание озона — около 200 единиц Добсона (DU) — за весь период наблюдений начиная с 1970-х гг.

Происходили ли такие эпизоды ранее? Проблема снижения уровня стратосферного озона и интерес к его прошлым изменениям связаны с увеличением дозы ультрафиолетовой радиации в коротковолновом диапазоне, проходящей через озоновый фильтр на поверхность Земли. Временные ряды долгопериодных колебаний ОСО рассчитываются при помощи спектрального сингулярного метода, реализованного в программе CaterpillarSSA, и методом множественной регрессии по откликам годичных колец хвойных деревьев. Полученные таким образом данные позволяют ответить на этот вопрос и представляют собой реконструкции исторических изменений ОСО в атмосфере [16].

В течение сезона роста у деревьев формируется древесная структура годичных колец со свойствами композиционного материала. Каждый компонент годичного кольца: углеродсодержащая матрица, вода и углекислый газ — содержит отклики на изменения условий окружающей среды. На основе многокомпонентной модели суммарные отклики годичных колец могут быть использованы для реконструкции изменений ОСО.

Достоверность разработанной модели откликов годовых колец хвойных на изменения атмосферных параметров подтверждается на выборке эргодических хронологий компонентов древесины. Критерий Дарбина–Уотсона позволяет выделить группу хронологий, в моделях которых отсутствует автокорреляция возмущений. Использование модели суммарных откликов для трех компонентов древесины существенно повышает достоверность реконструкции исследуемых атмосферных параметров [14].

Биоиндикация и прогноз изменений ОСО имеют практическое значение для зональной оценки экологической ситуации и стратегии развития лесопромышленного комплекса. Интеллектуальный анализ данных помогает сформировать выборку данных MXD, для которых изменения ОСО являются значимым фактором. По индексам ОСО также могут быть рассчитаны тенденции плотности древесины в годовых кольцах.

Изменения ОСО начиная с 1979 г. можно оценить по данным регулярных спутниковых наблюдений. Анализ состояния озонового слоя над различными регионами показывает, что в будущем снижение уровня ОСО может быть близким к озоновой депрессии 1970-х гг. [17].

Анализ реконструкций ОСО продолжительностью более 100–400 лет помогает выявить длительные закономерности в его изменениях. Отсутствие данных по плотности годовых колец в последние 20 лет не позволяет использовать весь временной диапазон инструментальных измерений ОСО для обучающей выборки.

Цель статьи — реконструкции ОСО по дендрохронологическим данным и расширение представлений о региональной составляющей поля ОСО в зонах Южного, Среднего и Полярного Урала.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Обработка данных. Исследование выполнено по дендрохронологическим, метео- и спутниковым данным, характеристики которых представлены в табл. 1 и 2. Расположение мест наблюдений с доступными данными представлено на карте (рис. 1). Там же обозначены зоны, в границах которых сформированы статистически значимые выборки данных.

На территории горного хребта, протянувшегося с севера на юг вдоль уральского меридиана, сформировался типично горный климат с неравномерно распределенными по отдельным областям осадками. На западных склонах Уральских гор выпадает значительно большее количество осадков, нежели на восточных. Резкая смена погоды связана с сильным влиянием западных ветров с побережья Атлантики и близостью континентального климата Западно-Сибирской равнины с более прохладными (по сравнению с восточно-европейскими) воздушными массами.

Таблица 1

Характеристики хронологий MXD, по [18]

Номер географической точки сбора данных MXD, координаты	Порода деревьев	Высота произрастания деревьев, м	Длина ряда, годы	Код хронологии, исследователи*, количество ядер
1 (55° с. ш. 59° в. д.)	Сосна	990	1971–1993	RUSS118, 1, 28
2 (60° с. ш. 59° в. д.)	Сосна	720	1612–1992	RUSS099, 1, 28
3 (60° с. ш. 57° в. д.)	Ель	140	1680–1991	RUSS104, 1, 30
4 (60° с. ш. 57° в. д.)	Сосна	140	1717–1991	RUSS116, 1, 30
5 (60° с. ш. 57° в. д.)	Лиственница	140	1730–1991	RUSS117, 1, 30
6 (61° с. ш. 59° в. д.)	Ель	670	1703–1993	RUSS120, 1, 28
7 (62° с. ш. 59° в. д.)	Ель	340	1616–1991	RUSS095, 1, 29
8 (65° с. ш. 60° в. д.)	Лиственница	400	1588–1990	RUSS123, 1, 30
9 (65° с. ш. 64° в. д.)	Лиственница	30	1828–1994	RUSS180, 1, 26
10 (66° с. ш. 56° в. д.)	Лиственница	65	1784–1990	RUSS042, 1, 20
11 (66° с. ш. 56° в. д.)	Лиственница	65	1694–1990	RUSS046, 1, 27
12 (66° с. ш. 56° в. д.)	Лиственница	60	1630–1990	RUSS064, 1, 24
13 (67° с. ш. 65° в. д.)	Лиственница	190	1641–2001	RUSS224, 2, 33
14 (67° с. ш. 65° в. д.)	Лиственница	190	1845–2006	RUSS225, 2, 33
15 (68° с. ш. 60° в. д.)	Ель	75	1751–2000	RUSS237, 3, 100

Примечание. Измерения плотности годовых колец хвойных проводились рентгенографическим методом.

* 1 — Ф. Швейнгрубер; 2 — А. Кирдянов; 3 — Д. Эспер, Д. Нивергельт, Ф. Швейнгрубер.

Таблица 2

Расположение метеостанций, по [19]

Номер географической точки сбора данных MXD	Индекс ВМО*	Наименование станции	Высота метеоплощадки, м
1	28630	Златоуст	532
2	23921	Ивдель	93
3–5	23914	Чердынь	208
6	23921	Ивдель	93
7	23724	Няксимволь	50
8	23324	Петрунь	61
9	23330	Салехард	15
10–12	23412	Усть-Уса	77
13, 14	23220	Елецкая	113
15	23022	Амдерма	53

Примечание. Координаты точек — см. табл. 1.

* Всемирная метеорологическая организация.

Регулярные наблюдения за температурой и осадками по данным метеостанций (см. табл. 2) ведутся с 1966 г. Влияние климатических изменений на MXD рассматривалось по расчетным значениям индекса де Мортонна, характеризующего сухость климата.

Суммирование по месяцам, сглаживание и сдвиг рядов исходных данных относительно друг друга позволяют учесть в корреляционном анализе и при реконструкции ОСО различия вегетационных периодов в зависимости от широты произрастания деревьев и изменения в разрешении метода. Изменения в разрешении 1, 2, 3, 4 года связаны с накопительным эффектом влияния различных факторов на отклики деревьев в годичных кольцах и различием времени жизни хвои у деревьев разных пород [12, 16].

Условия роста годичного кольца сопоставляются со среднемесячными климатическими параметрами за месяц или период вегетации. Учитывая территориальный разброс среднемесячных значений климатических параметров и ОСО, а также различия в средних значениях MXD разных пород, все данные нормируются. Факторный анализ позволяет рассмотреть процент объясненной дисперсии и количество значимых факторов, связывающих изменения ОСО и MXD. Особенности факторного анализа дендрохронологических данных подробно описаны в [12].

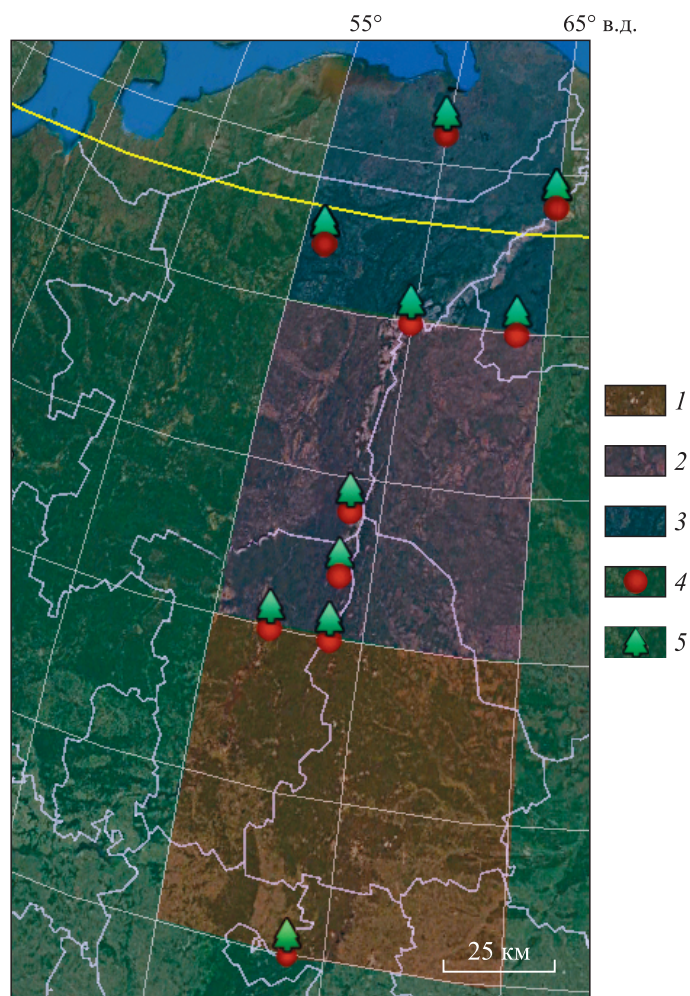


Рис. 1. Карта исследования зон уральского меридиана на платформе Google Earth (<https://earth.google.com>).

1–3 — зоны уральского меридиана; 4 — места расположения метеостанций; 5 — места сбора ядер для получения данных плотности годичных колец хвойных деревьев различных пород.

Результаты корреляционного анализа ОСО и MXD приведены в табл. 3 и характеризуют типичное влияние ОСО (УФ-В-радиации) на максимальную плотность годовых колец в горной местности.

Для факторного анализа рассматривались выборка хронологий MXD для исследуемой территории и отдельно выборка хронологий MXD, чувствительных к изменениям ОСО. Количество хронологий с высокими значениями объясненной дисперсии ограничено в среднем 50 %. Результаты факторного анализа (см. табл. 3) всей выборки хронологий MXD показали, что лимитирующее действие окружающей среды оказывает только один фактор из набора от 2 до 5 значимых факторов. Это может быть географическое положение, температура, осадки, ОСО, индекс де Мортонна. Факторный анализ выборки чувствительных к ОСО хронологий плотности годовых колец показал, что количество значимых факторов в этом случае сократилось.

Нормирование показателей $Index(t)$ выполнялось по формуле:

$$Index(t) = \frac{[X(t) - mean]}{STD}, \quad (1)$$

где $X(t)$ показатель, $mean$ — среднее значение показателя, STD — среднее квадратичное отклонение.

В зависимости от высоких или низких температур воздуха, недостатка или избытка осадков негативное воздействие ОСО на годичный прирост хвойных может усилиться или исчезнуть. Оценить этот эффект можно по анализу трендов временных рядов индекса де Мортонна и ОСО.

Индекс де Мортонна (IM) рассчитывался по формуле:

$$IM = \Sigma P / (T + 10), \quad (2)$$

где ΣP (мм) — общее количество осадков с апреля по сентябрь, выпавших на Урале; T (°C) — средняя с апреля по сентябрь температура воздуха.

Таблица 3

Результаты корреляционного и факторного анализа откликов годовых колец хвойных уральского меридиана

Номер географической точки сбора данных MXD	Корреляционный анализ ОСО и MXD	Факторный анализ, % от общей дисперсии	
		полная выборка хронологий MXD	выборка хронологий MXD, чувствительных к изменению ОСО
Зона 1 (55–60° с. ш. 56–64° в. д.), вегетация – с апреля по сентябрь, $R = -0,95$			
1	0,56–0,96	65/6/7 (3)*	77/9 (2)
2	0,54–0,68	76/6/5 (3)	73 (1)
3	0,68–0,89	27/19/15/10/8 (5)	35/20/17/8 (4)
4	0,6–0,82	40/20/11/8/6 (5)	54/18 (2)
5	0,63–0,83	42/17/11/8/7 (5)	54/19/11 (3)
Зона 2 (60–65° с. ш. 56–64° в. д.), вегетация – с мая по сентябрь, $R = -0,82$			
6	0,52–0,8	43/25/11/6/4 (5)	45/30 (2)
7	0,52–0,93	52/14/9/6/4 (5)	57/13/8/5 (4)
8	0,63–0,97	67/13 (2)	64/17 (2)
9	0,58–0,97	54/17/9/5 (4)	63/17/7 (3)
Зона 3 (65–70° с. ш. 56–64° в. д.), вегетация – с июня по август, $R = -0,8$			
10	0,62–0,93	60/12/9/6 (4)	56/18/14 (3)
11	0,6–0,98	74/11 (2)	79 (1)
12	0,61–0,87	44/16/13 (3)	55/20 (2)
13	0,71	68/11/6 (3)	63 (1)
14	0,37–0,49	70/7/5 (3)	72 (1)
15	0,47–0,91	61/18/7 (3)	74/8/7 (3)

Примечание. Общее количество хронологий MXD — 330, значимая корреляция — 0,35, вероятностный уровень $p < 0,001$, отсутствие значимой корреляции — у 48,78 % хронологий, положительная — у 11,51 %, отрицательная — у 38,78 % хронологий. R — отрицательная корреляция между ОСО и MXD.

* В скобках указано число значимых факторов: температура воздуха, количество осадков, УФ-В-радиация (три фактора) или засушливость климата, УФ-В-радиация (два фактора); к ним могут добавиться влажность почвы, микроэлементное питание и др.

Структурный анализ результатов проводился на основе расчета показателя Хёрста реконструированных данных ОСО. Показатель Хёрста найден как оценка углового коэффициента $\hat{k}$ линейной регрессии $y = kx - b$, полученная методом наименьших квадратов, где

$$y = \ln\left(\frac{R}{S}\right), x = \ln(n), k = H, b = H \ln(c).$$

Здесь R — размах накопленных отклонений значений временного ряда от среднего значения, S — стандартное отклонение, n — число наблюдений, c — константа, H — показатель Хёрста. Значения $H > 0,5$ позволяют отнести результаты к классу с устойчивой тенденцией, причем чем ближе H к 1, тем более вероятен прогноз моделируемого ряда.

Методика реконструкции ОСО. В методике реализован классический подход реконструкции изменений температуры и осадков по дендрохронологическим данным, основанный на методе линейной регрессии. Исходные данные приведены в [18, 19]. Пример такой реконструкции можно найти в [20].

Рассматриваемый объект реконструкции — общее содержание озона — имеет ряд отличий от других климатических факторов. Например, во временных рядах инструментальных наблюдений ОСО присутствуют квазидвухлетние колебания, которые накладываются на накопительный и запаздывающий эффекты формирования плотности годичных колец. Значения дисперсии в откликах деревьев на воздействие ОСО значительно меньше дисперсии аналогичных откликов на изменения температуры и осадков. Функции отклика годичных колец можно выделить в трех компонентах стволовой древесины — углеродсодержащем веществе или древесной матрице (70–90 %), воде (13–17 %) и CO_2 (1,4–2,4 %) [14]. При таком подходе наилучший инструмент для предварительной обработки данных в методике реконструкции — программа CaterpillarSSA.

При высокой отрицательной корреляции ОСО и MXD упрощенный алгоритм реконструкции ОСО предполагает использование в регрессионной модели составляющей дендрохронологического сигнала, которая содержит отклик на изменения ОСО древесной матрицы годичного кольца. В среднем это составляет 70–90 % от всего сигнала.

Последовательность действий в программе CaterpillarSSA для подготовки данных к реконструкции ОСО включает в себя выбор наиболее чувствительных к изменению ОСО хронологий MXD и их усреднение по зонам; центрирование региональных рядов MXD; формирование временного ряда MXD из суммы компонент разложения плотности древесной части годичного кольца без учета компонент двукратного нормирования данных.

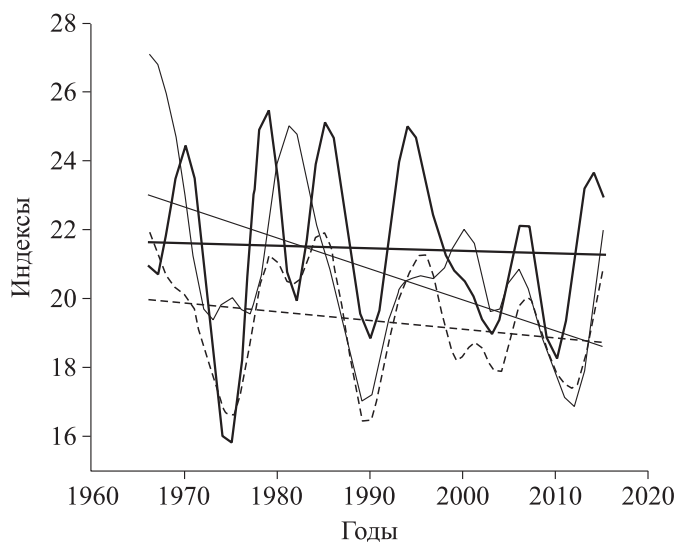
Центрирование временных рядов MXD означает выявление основной тенденции путем «очистки» временного ряда от искажающих эту тенденцию случайных отклонений. Длина окна разложения при центрировании ряда интуитивно определяется количеством действующих на прирост годичного кольца факторов: семь — для зон 1 и 2 и восемь — для зоны 3. Такой выбор снижает амплитуду случайных отклонений в зонах при одинаковом проценте суммы компонент разложения хронологий-предикторов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для обработки и визуализации данных использовались программы CaterpillarSSA [21], Origin [22] и MS Excel. Факторный и корреляционный анализ временных рядов ОСО и MXD показал, что временные ряды MXD можно разбить на две категории — чувствительные к изменениям ОСО (УФ-В-радиации) и чувствительные к климатическим изменениям. Для реконструкции использовалась группа MXD-хронологий, чувствительных к изменениям ОСО. По мере продвижения на север чувствительность деревьев к воздействию ОСО (УФ-В-радиации) падает, но степень корреляции отдельных деревьев практически не изменяется. Возможно, на число чувствительных к ОСО деревьев влияет сокращение вегетационного периода.

По значениям индекса де Мортонa видно, что засушливость климата в пределах уральского меридиана в современный период постепенно растет или находится на одном уровне (рис. 2). Когда тенденция IM совпадает с понижением ОСО, реакции деревьев на климатические изменения усиливаются и амплитуды MXD изменяются в зависимости от метаболических процессов в дереве [12]. Это приводит к тому, что число чувствительных к изменениям ОСО деревьев и значения коэффициентов корреляции ОСО и MXD возрастают. И чем выше коэффициент корреляции, тем выше достоверность реконструкции. Результаты реконструкций ОСО по зонам уральского меридиана приведены на рис. 3.

Рис. 2. Ряды индексов де Мортон для зоны 1 (сплошная тонкая линия), зоны 2 (сплошная толстая линия) и зоны 3 (штриховая линия) уральского меридиана.



Верификация реконструкций ОСО. Для зоны 1 по двум выборкам — спутниковых (n) и реконструированных (m) данных, объемы которых $n = 37$ и $m = 329$, были найдены выборочные средние $\bar{x}_b = 0,422$ и $\bar{y}_b = 0,500$ и выборочные дисперсии $D(X) = 0,060$ и $D(Y) = 0,045$ (табл. 4). Проверим предварительно гипотезу о равенстве генеральных дисперсий, используя критерий Фишера—Снедекора. Найдем отношение большей дисперсии к меньшей:

$$F_{\text{набл}} = \frac{0,060}{0,045} \approx 1,336. \quad (3)$$

При уровне значимости $\alpha = 0,1$ проверим нулевую гипотезу $H_0: D(X) = D(Y)$ при конкурирующей гипотезе $H_1: D(X) \neq D(Y)$. Так как конкурирующая гипотеза имеет вид $D(X) \neq D(Y)$, то критическая область двусторонняя. По таблице критических точек распределения критерия Фишера—Снедекора, уровню значимости $\frac{\alpha}{2} = 0,05$ и числу степеней свободы $k_1 = n - 1 = 36$, $k_2 = m - 1 = 328$ находим критическую точку $F_{\text{кр}}(0,05; 36; 328)$, $F_{\text{набл}} < F_{\text{кр}}$, следовательно, нет оснований отвергнуть гипотезу H_0 , т. е. исправленные дисперсии различаются незначимо. Предположение о равенстве генеральных дисперсий выполняется, поэтому сравним выборочные средние.

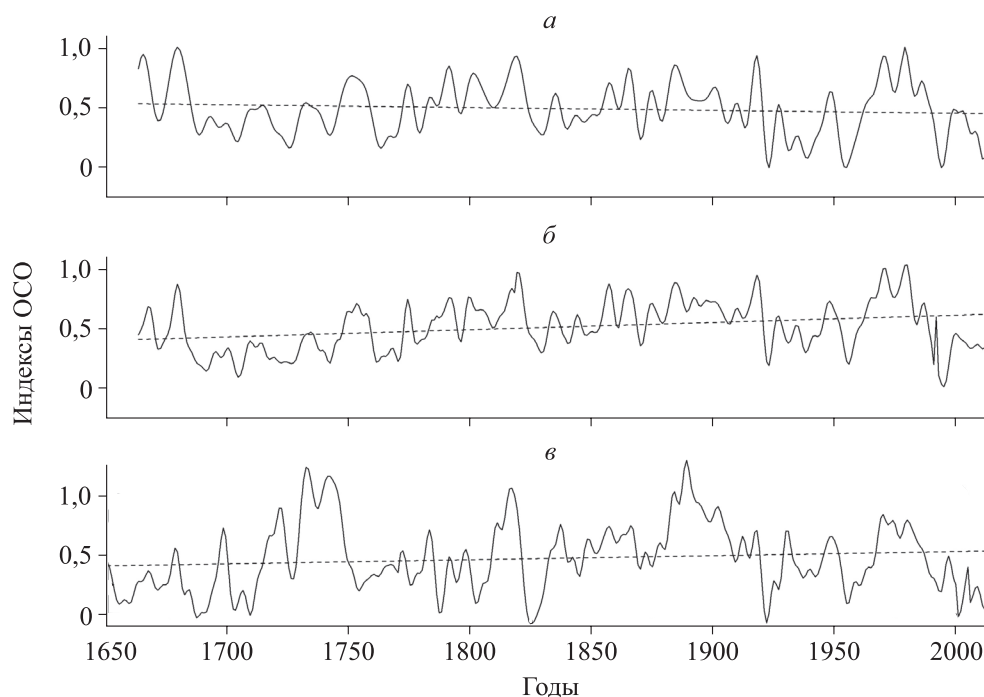


Рис. 3. Реконструкция вариаций ОСО вдоль уральского меридиана за вегетационный период.

а — зона 1; б — зона 2; в — зона 3. Сплошная линия — объединенные в один ряд и нормированные в пределах от 0 до 1 спутниковые и реконструированные данные ОСО. Штриховая линия — тренды.

Проверим при уровне значимости $\alpha = 0,02$ нулевую гипотезу $H_0: M(X) = M(Y)$ при конкурирующей гипотезе $H_1: M(X) \neq M(Y)$. Для этого найдем наблюдаемое значение критерия Стьюдента:

$$T_{\text{набл}} = \frac{(\bar{y}_b - \bar{x}_b)}{\sqrt{(n-1)D(X) + (m-1)D(Y)}} \sqrt{\frac{nm(n+m-2)}{n+m}} = 2,015. \quad (4)$$

Критическая область двусторонняя. По таблице критических точек распределения Стьюдента, уровню значимости $\alpha = 0,02$ и числу степеней свободы $k = n + m - 2 = 364$ находим двустороннюю критическую точку $t_{\text{двуст. кр}}(0,02; 364) = 2,33$. Так как $T_{\text{набл}} < t_{\text{двуст. кр}}$, то нет оснований отвергать гипотезу о равенстве выборочных средних спутниковых данных и реконструированных зоны 1. Таким образом, можно считать реконструкцию ОСО, выполненную для зоны 1, успешной. Аналогичные расчеты для зон 2 и 3 в предполагаемый период роста годовых колец с апреля по сентябрь показали, что достоверные результаты реконструкции ОСО наблюдались только за короткий промежуток времени (37 и 60 точек).

Фенологические данные для уральского меридиана свидетельствуют о том, что вегетационный период для зоны 2 длится 4,5–5 мес., для зоны 3 — 2,5–3 мес. Мы предположили, что использование более широких временных рамок в расчетах средних изменений ОСО для зон 2 и 3 повлияло на амплитуду отклика MXD за счет мнимого увеличения степени воздействия ОСО на годовые кольца.

Поэтому в дальнейшем для расчета реконструкции ОСО и выборочных характеристик реконструкций использовались среднемесячные значения ОСО с апреля по сентябрь для зоны 1, с мая по сентябрь — для зоны 2, с июня по август — для зоны 3 (табл. 4).

Верификация региональной реконструкции ОСО сравнением при помощи критерия Фишера–Снедекора генеральных дисперсий двух независимых выборок (спутниковых и реконструированных данных) позволяет не только ограничить длительность достоверной реконструкции, но и выделить факторы, которые вызывают искажение результатов. В нашем случае это длительность вегетационного периода. Так, несмотря на высокую корреляцию между ОСО и MXD, неправильная оценка периода роста искажает результаты реконструкции, делая их быстро, по мере продвижения в прошлое, недостоверными.

Тенденции реконструкций ОСО (см. рис. 3) для всех зон уральского меридиана были оценены по значениям показателя Хёрста H . Значения H для рядов спутниковых наблюдений в зонах 1–3 не позволяют сделать вывод об устойчивости тенденций в изменениях ОСО. При этом по значениям H для продолжительных рядов реконструированных значений ОСО можно заключить, что все три реконструкции показывают практически одинаково устойчивые, но разнонаправленные тенденции (табл. 5).

Таблица 4

Выборочные характеристики спутниковых и реконструированных данных ОСО за вегетационный период для зон уральского меридиана

Выборочное среднее данных		Выборочная дисперсия		Выборочное среднее квадратичное отклонение		Объем выборки	
$\bar{x}_b$	$\bar{y}_b$	$D(X)$	$D(Y)$	$\sigma(x)$	$\sigma(y)$	n	m
Зона 1, вегетация — с апреля по сентябрь							
0,422	0,497	0,060	0,045	0,244	0,211	37	329
Зона 2, вегетация — с мая по сентябрь							
0,445	0,517	0,059	0,041	0,242	0,203	37	329
Зона 3, вегетация — с июня по август							
0,3450	0,469	0,068	0,082	0,260	0,286	37	369

Примечание. $\bar{x}_b$ и $\bar{y}_b$ — выборочное среднее спутниковых и реконструированных данных; $D(X)$ и $D(Y)$ — выборочная дисперсия спутниковых и реконструированных данных; $\sigma(x)$ и $\sigma(y)$ — выборочное среднее квадратичное отклонение спутниковых и реконструированных данных; n и m — объемы выборок для спутниковых и реконструированных данных соответственно.

Таблица 5

Показатели Хёрста временных рядов спутниковых и реконструированных данных ОСО для уральского меридиана

Уральский меридиан	Показатель Хёрста	
	спутниковые данные	реконструированные данные
Зона 1	0,505	0,619
Зона 2	0,536	0,718
Зона 3	0,429	0,676

Реконструкция ОСО в зависимости от широты и долготы по составляющей плотности годовых колец, обнаруженной сингулярным спектральным методом, позволяет получить региональные изменения ОСО на длительном временном промежутке (с 1650 г. по настоящее время). Несмотря на различия в тенденциях для зон уральского меридиана (от незначительного роста до отрицательного тренда) наблюдаемое ОСО имеет по-прежнему низкий уровень. При таком уровне появление озоновых дыр, особенно в месяцы с заведомо низкими средними значениями температуры воздуха, по-прежнему вероятно.

Подробный анализ реконструкций ОСО, требующий сопоставления исторических данных об изменениях климата, извержениях вулканов и, возможно, о других событиях, повлиявших на уровень ОСО в атмосфере, был бы интересен для зональной оценки состояния озоносферы северных широт и может стать темой последующего исследования.

Работа выполнена в рамках темы госзадания (121031300156–5).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кривоуцкий А.А., Репнев А.И., Миронова И.А., Груздев А.Н., Тунияц Т.И. Результаты российских исследований средней атмосферы в 2015–2018 гг. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. — 2019. — Т. 55, № 6. — С. 48–65 (на англ. яз.).
2. Володин Е.М. Оценка вклада различных механизмов в эволюцию фазы квазидвухлетнего колебания по результатам климатического моделирования // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. — 2019. — Т. 55, № 1. — С. 35–40.
3. Sidorenkov N.S. Synchronization of terrestrial processes with frequencies of the Earth–Moon–Sun system. // Astronomical and Astrophysical Transactions. — 2017. — Vol. 30, Is. 2. — P. 249–260.
4. Sidorenkov N.S. Celestial mechanical causes of weather and climate change // Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics. — 2016. — Vol. 52, N 7. — P. 667–682.
5. Egorova T., Rozanov E., Arsenovic P., Sukhodolov T. Ozone layer evolution in the early 20th century // Atmosphere. — 2020. — Vol. 11. — P. 169–182. — DOI: 10.3390/atmos11020169.
6. Rozema J., Boelen P., Blokker P. Depletion of stratospheric ozone over the Antarctic and Arctic: responses 134 of plants of polar terrestrial ecosystems to enhanced UV-B, an overview // Environmental Pollution — 2005. — Vol. 137. — P. 428–450.
7. Биоиндикация стратосферного озона / Под общ. ред. В.В. Зуева. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2006. — 228 с. — (Интеграционные проекты СО РАН; вып. 10).
8. Доступ к спутниковым данным по общему содержанию озона проекта TEMIS [Electronic resource]. — <http://temis.nl> (дата обращения 06.12.2021).
9. Zuev V.V., Bondarenko S.L., Zueva N.E. Analysis of volcanogenic perturbations of the subarctic ozonosphere on the basis of space monitoring data // Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics. — 2011. — Vol. 47. — P. 1032–1038.
10. De Martonne E. Une Nouvelle. Fonction Climatologique: L'Indice d'Aridite [A new climatological function: the aridity index] // La Météorologie. — 1926. — Vol. 2. — P. 449–458.
11. Parfenova E., Tchebakova N.M., Soja A. Assessing landscape potential for human sustainability and 'attractiveness' across Asian Russia in a warmer 21st century // Environmental Research Letters. — 2019. — Vol. 14, N 6. — P. 1–14.
12. Bondarenko S.L., Savchuk D.A. Response of conifers to UV-B and climate in mountain areas // Global Journ. of Environmental Science and Management. — 2018. — Vol. 4, N 3. — P. 299–314.
13. Зуев В.В., Бондаренко С.Л., Савчук Д.А., Бочаров А.Ю. Зонирование территории для целей лесовосстановления по изменениям общего содержания озона в атмосфере (на примере Томской области) // География и природ. ресурсы. — 2009. — № 3. — С. 42–47.

14. Зуев В.В., Бондаренко С.Л., Устинова И.Г. Реконструкция изменений стратосферного озона в таежной зоне на основе сингулярного спектрального анализа // Изв. Томск. политех. ун-та. Инжиниринг георесурсов. — 2022. — Т. 333, № 3. — С. 174–183.
15. Еланский Н.Ф. Российские исследования атмосферного озона и его предшественников в 2015–2018 гг. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. — 2020. — Т. 56, № 2. — С. 170–185.
16. Зуев В.В., Бондаренко С.Л. Исследование озоносферы методами дендрохронологии. — Томск: Изд-во СО РАН, 2007. — 168 с.
17. 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.
18. The International Tree-Ring Data Bank // National Centers for Environmental Information [Электронный ресурс]. — <https://www.ncdc.noaa.gov/data-access/paleoclimatology-data/datasets/tree-ring> (дата обращения 07.12.2021).
19. Доступ к метеоданным [Электронный ресурс]. — <http://meteo.ru/data> (дата обращения 07.12.2021).
20. Гурская М.А., Кукарских В.В., Ланге Е. Реконструкция температуры летних месяцев на основе годовичных колец сосны обыкновенной *Pinus sylvestris* L., произрастающей в бассейне р. Печора // Изв. РАН. Сер. геогр. — 2018. — № 2. — С. 59–73.
21. Caterpillar [Электронный ресурс]. — <https://www.gistatgroup.com> (дата обращения 07.12.2021).
22. OriginLab [Электронный ресурс]. — <https://originlab.com> (дата обращения 07.12.2021).

Поступила в редакцию 23.03.2022

После доработки 23.05.2022

Принята к публикации 05.07.2022