

В.В. Зуев, С.Л. Бондаренко

## Взаимосвязь долгопериодной изменчивости озонового слоя атмосферы с обусловленной УФ-Б-воздействием изменчивостью плотности древесины

*Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск*

Поступила в редакцию 2.10.2001 г.

Представлен корреляционный анализ дендрохронологических временных рядов хвойных пород деревьев из International Tree-Ring Data Bank с хронологией общего содержания озона в Ароза, Швейцария. Наиболее ярко взаимосвязь проявляется с такой характеристикой, как плотность древесины. Отрицательная корреляция между хронологиями средней плотности и общего содержания озона, например для пинии (Stone Pine) по абсолютной величине превышает 0,6. Озон поглощает УФ-излучение в том же диапазоне длин волн, что и молекулы живых клеток. Чем тоньше слой озона, тем выше уровень солнечной УФ-радиации, достигающей земной поверхности. УФ-Б-радиация вызывает стресс у растения, угнетая рост его клеток. Этот процесс находит биологический отклик в кольцах деревьев, что позволяет использовать дендрохронологические ряды для качественной реконструкции общего содержания озона в период вегетационного периода деревьев (апрель–сентябрь).

### Введение

Прогноз развития озонового слоя земной атмосферы до сих пор вызывает бурные дискуссии. Как известно, наблюдаемые со второй половины 70-х гг. по первую половину 90-х XX в. неуклонные тенденции разрушения озонового слоя связывали с производством и выбросами в атмосферу озоноразрушающих веществ, в первую очередь фреонов. В результате Монреальским протоколом от 1987 г. производство этих веществ было запрещено. Последствия этого акта из-за большого времени жизни фреонов в тропосфере могли проявиться не ранее второй четверти XXI в. (в России, например, Монреальский протокол всецело выполняется только с 2000 г.). Однако после продолжительной озоновой депрессии, длившейся после извержения вулкана Пинатубо (июнь 1991 г.) более четырех лет, с 1996 г. содержание стратосферного озона стало расти, практически достигнув через два года уровня 70-х гг. [1].

Столь бурные темпы роста стратосферного озона невозможно связать с реализацией Монреальского протокола. Здесь явно действуют какие-то иные, скорее всего динамические причины. Однако изменение стратосферной циркуляции может быть обусловлено как природными, так и антропогенными факторами, в частности, влиянием парниковых газов. В этом плане проблема прогноза поведения озонового слоя в будущем сродни прогнозу климатических изменений.

Как известно, один из подходов изучения климата будущего заключается в исследованиях палеоклимата. Статистический прогноз общего содержания озона (ОСО) в атмосфере, как и прогноз любых других климатических параметров, также может заклю-

чаться в построении выводов о поведении озонового слоя на основании статистических характеристик в прошлом. Одним из этапов статистического прогнозирования является выбор предикторов. К сожалению, продолжительность рядов наблюдений за озоновым слоем не позволяет проследить долгопериодные глобальные атмосферные процессы, связанные с длительными циклами солнечной активности. Самый длинный ряд по ОСО в атмосфере с 1926 г. составлен для Арозы, Швейцария (46°78' с.ш., 9°68' в.д.). Спутниковый мониторинг глобального поля ОСО ведется лишь с 1978 г. Поэтому интересно найти характеристики более продолжительных временных рядов, косвенно взаимосвязанные с рядом наблюдений ОСО.

Общепризнанно, что дендрохронологические ряды – это кладезь информации о природных экологических системах. Ряды данных, опубликованные в Интернете, представляют разветвленную информационную сеть и являются статистически обеспеченными. Для различных видов древесных пород представлены временные ряды таких характеристик, как ширина годичного кольца дерева, ширина годичного кольца ранней древесины, ширина годичного кольца поздней древесины, максимальная и минимальная плотность древесины. Ширина годичного кольца широко используется в качестве предиктора изменения климата. Так, многие публикации по изучению палеоклимата посвящены реконструкции температуры и количества осадков из данных дендрохронологических рядов. Это и понятно, поскольку температура и количество осадков являются основными лимитирующими факторами в формировании годичного кольца дерева. Между тем эти факторы не единственные. На ско-

рость роста деревьев влияют биологические и генетические особенности вида, их возраст, уровень падающей солнечной радиации, а также ряд других факторов. Таким образом, возникают вопросы: какое же влияние оказывает озоновый слой атмосферы на дендрохронологические характеристики и какие из них могут быть выбраны в качестве предиктора климатических изменений озона?

Цель данной работы – ответить на эти вопросы и обосновать выбор предиктора палеоизменений общего содержания озона из характеристик дендрохронологических рядов. Для этого рассмотрим вопрос взаимосвязи долгопериодной изменчивости озонового слоя атмосферы с обусловленной УФ-Б-воздействием изменчивостью характеристик радиального прироста деревьев.

### Постановка задачи

Следует различать воздействие на рост и продуктивность растений тропосферного и стратосферного озона. Тропосферный озон оказывает прямое воздействие на растение, проникая внутрь него через дыхательные устья и изменяя биохимические и физиологические процессы в клетках. Известно, в частности, что при повышении концентрации озона в приземном слое атмосферы наблюдается снижение годичного прироста сосен [2]. Воздействие стратосферного озона на рост растений, безусловно, является косвенным и связано со стрессом растений при изменении контролируемого озоновым слоем уровня УФ-Б-радиации, приводящим к сокращению зеленой биомассы (уменьшению кроны деревьев, увеличению плотности хвои для хвойных и т.д.). Следует подчеркнуть, что увеличение уровня УФ-Б-радиации может провоцировать рост тропосферного озона [3] за счет дополнительной генерации мощнейшего окислителя гидроксила ОН, играющего ключевую роль в циклах тропосферного озона. Таким образом, при повышении уровня УФ-Б-радиации возможно удвоение стрессового воздействия на растения.

Озон поглощает солнечное УФ-излучение в том же диапазоне длин волн, что и молекулы живых клеток. Общеизвестно, что чем тоньше слой озона, тем выше уровень солнечной УФ-радиации, достигающей поверхности Земли. Средняя интенсивность солнечной УФ-Б-радиации и ее изменчивость сильно зависят от широты и угловой высоты Солнца. Поэтому обусловленное УФ-Б-воздействием изменение роста растений напрямую связано с местом их обитания. Например, максимальные колебания ОСО наблюдаются в умеренных и полярных широтах. В дендрохронологических исследованиях (имитационная модель [4]), как правило, рассматривается влияние освещенности на растения в видимом диапазоне света, а спектральные вариации излучения не учитываются. Между тем именно изменение спектрального состава падающей солнечной радиации, особенно в УФ-Б-диапазоне, оказывают влияние на годовой прирост растений.

Для большинства исследований о влиянии УФ-Б-излучения на растительность экспериментальные

данные собраны в лабораторных условиях, в основном для зеленой биомассы (для листа или хвои). Совершенно ясно, что для того чтобы обнаружить за счет долгопериодных колебаний УФ-Б-воздействий изменения в экосистеме, недостаточно сделать одноили двулетний цикл измерений, а нужны исследования в течение многих десятилетий или даже столетий. Дендрохронологические ряды дают материал для анализа, полученный на продолжительном временном интервале более 200–400 лет. Однако следует учитывать, как это следует из литературных данных, что не все виды растений одинаково чувствительны к УФ-Б-излучению. К примеру, кедровая сосна представляется наиболее отзывчивым деревом к УФ-Б-воздействию из всех видов хвойных [5]. Причем воздействие УФ-Б-излучения отражается главным образом в увеличении плотности растения [6].

При анализе дендрохронологических рядов должны учитываться физико-географические факторы. Сезонный рост деревьев для разных широт имеет различный временной интервал, отличающийся стартом, но заканчивающийся примерно одинаково. Кроме того, в одном и том же физико-географическом районе сроки начала сезонного роста и его продолжительность зависят от высоты над уровнем моря и рельефа местности [4], поэтому дендрохронологический ряд для сравнения с данными по общему содержанию озона должен быть выбран для одной и той же местности. Для анализа были взяты хронологии хвойных пород деревьев из International Tree-Ring Data Bank [7].

### Результаты анализа и их обсуждение

Для Швейцарии дендрохронологические ряды представлены в основном хвойными. Например, для местности вблизи курорта Ароза – это ель (Norway Spruce), пиния (Stone pine), пихта (European fir) и лиственница (European larch). Вегетационный период деревьев в Арозе продолжается с апреля по сентябрь.

Стандартизированные хронологии хвойных пород деревьев для этой местности представлены по следующим характеристикам древесины: ширина годичного кольца дерева, ширина ранней и поздней древесины, максимальная и минимальная плотность древесины. Обычно полагают, что биологический отклик хвойных видов деревьев на УФ-Б-излучение запаздывает на 1–2 года [8], поэтому анализ проводился для сглаженных по 2 годам характеристик временных рядов. Во временных рядах, выбранных для анализа, отсутствует автокорреляция (влияние возраста дерева) и удален тренд.

Результаты корреляционного анализа представлены в таблице. Наиболее ярко проявилась связь общего содержания озона со средней плотностью древесины, особенно для пинии. Лиственница более чувствительна к изменениям температуры и влажности, чем другие виды анализируемых хвойных деревьев, поэтому менее выраженный фактор, влияющий на развитие древесины, остался без значимого отклика.

Результаты корреляционного анализа

Имя файла в банке данных	Временные границы хронологий, гг.	Вид	Географические координаты (с.ш. – в.д.)	Корреляция озон/средняя плотность древесины
Swit107.....dat	1690–1975	Norway spruce	46°48' – 9°41'	–0,42
<b>Swit109.....dat</b>	<b>1788–1974</b>	<b>Stone pine</b>	<b>46°24' – 8°01'</b>	<b>–0,63</b>
Swit111.....dat	1792–1974	European larch	46°24' – 8°01'	–0,15
Swit113.....dat	1822–1980	European fir	46°18' – 7°37'	–0,4

Плотность клетки древесины оценивается как отношение площади клеточной стенки к площади, занимаемой клеткой на поперечном сечении. Характеристика «плотность древесины» – это сумма плотностей всех клеток. Показатели плотности годовичных колец меньше подвержены возрастным изменениям, чем ширина кольца, но также зависят от внутренних и внешних факторов. Имеются результаты корреляции максимальной плотности с температурой за отдельные пятидневки, физиологически не объяснимые. Если исключить такие годы из рядов, то корреляция с температурой становится незначительной. Экспериментальные исследования показывают, что на количество клеток поздней древесины и на толщину стенок клетки влияют освещенность и фотопериод [4]. Плотность древесины хвойных деревьев связана отрицательной зависимостью с шириной кольца дерева. Ускорение роста древесины происходит за счет расширения слоя ранней древесины, что приводит к снижению плотности [9].

Из рис. 1 вытекает вывод, что средние значения ОСО за апрель – сентябрь лучше всего коррелируют

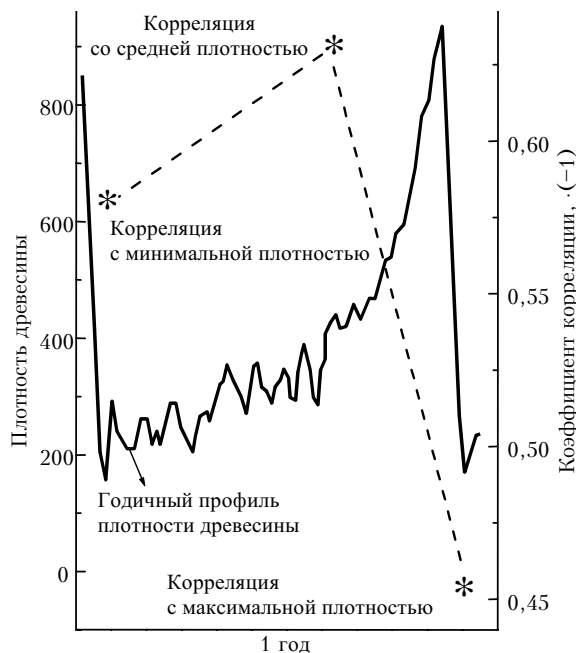


Рис. 1. Корреляция средних значений ОСО за апрель – сентябрь с плотностью древесины. Годичный профиль плотности древесины изображен согласно [10]

со средней плотностью годовичного кольца. Отрицательная корреляция между хронологиями средней плотности пинии и общим содержанием озона по абсолютной величине превышает 0,6, тогда как аналогичные корреляции для рядов с максимальной плот-

ностью древесины составляют 0,46, а для рядов с минимальной плотностью – 0,58.

На рис. 2 можно проследить изменения отклика растений на изменения стратосферного озона по месяцам вегетационного периода. Так, если рассматривать возможности реконструкции изменения ОСО с апреля по август, то корреляция будет выше –0,66, а изменение озона с июня по август лучше реконструировать по временным рядам минимальной плотности древесины (–0,648).

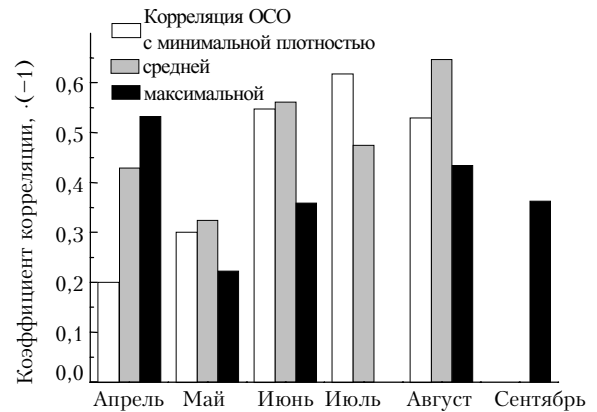


Рис. 2. Корреляция ОСО с плотностью древесины для разных месяцев вегетационного периода

Понятно, что физиологически объяснимый уровень УФ-Б-воздействия на дендрохронологический сигнал не может превышать суммарного воздействия на дерево влажности и температуры. Поэтому его воздействие более сильно проявляется в остатках. Для разложения временного ряда плотности древесины на простые компоненты использовался метод «Гусеница» (американский аналог SSA – Singular Spectrum Analysis) [11]. В основе метода лежит преобразование одномерного ряда в многомерный с помощью однопараметрической сдвиговой процедуры. Метод позволяет разлагать временной ряд на составляющие и восстанавливать его по выбранным главным компонентам. В нашем случае хороший результат получается из суммы 1 (31,2%) и 3 (10,96%) компонент при разложении ряда на 21 компоненту.

При подготовке данных для анализа из временных рядов методом линейной регрессии были убраны тренды, а для сопоставления параметров с различными диапазонами изменений абсолютные значения параметров были переведены в безразмерные индексы. В пакете программ Statistica для этого предназначена процедура стандартизации, суть которой заключается в пересчете значений временного ряда по формуле

$$X(t) = (X(t) - \text{MEAN}) / \text{STD},$$

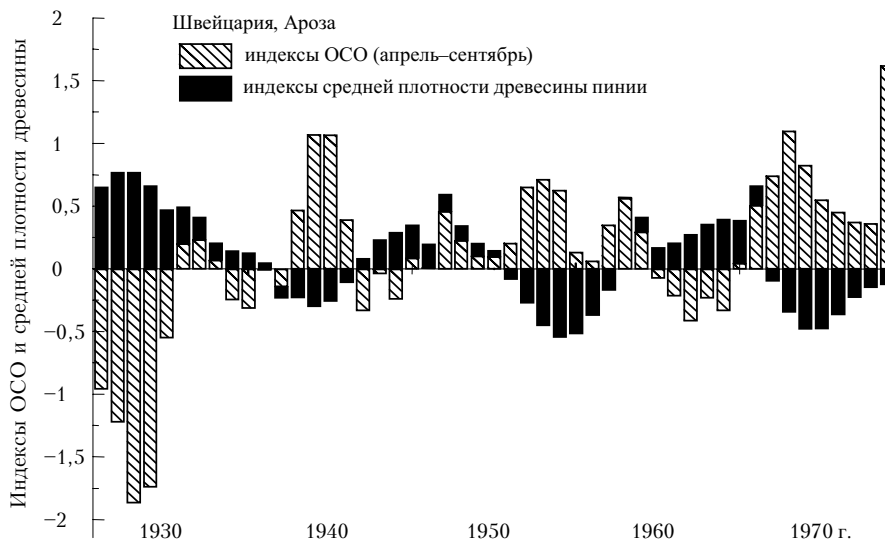


Рис. 3. Корреляция средних значений ОСО за апрель – сентябрь с 43%-й компонентой плотности древесины в течение периода с 1926 по 1974 г.

где  $X(t)$  – значение переменной ряда; MEAN – среднее значение ряда; STD – среднее квадратическое отклонение ряда.

На рис. 3 представлена взаимосвязь временных рядов между индексами ОСО за вегетационный период с апреля по сентябрь и индексами выделенной из дендрохронологического сигнала 43%-й компонентой: уровень корреляции составляет  $-0,79$ . Для тех лет, когда уровень радиации повышался в годовых кольцах, заметно увеличивалась средняя плотность древесины. К сожалению, временные рамки корреляционного анализа сужает то, что опубликованные в Интернете дендрохронологические ряды для местности Ароза ограничены 1974 г., в то время как данные, представленные по общему содержанию озона, заканчиваются 1997 г. Поэтому исследование необходимо продолжить на большей выборке данных и для различных географических координат. Полученные результаты уже сейчас позволяют использовать дендрохронологические данные по плотности древесины для качественной реконструкции общего содержания озона по годам в период биологической активности деревьев.

Считаем своим приятным долгом выразить благодарность Д.А. Савчуку за полезные дискуссии по теме статьи.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке по грантам РФФИ (проекты № 99-05-64943 и 98-05-03153).

*V.V. Zuev and S.L. Bondarenko. Relationship between long-period variability of atmospheric ozone layer and UV-B induced variability of wood density.*

The paper presents an analysis of correlations between dendrochronological time series of coniferous trees from International Tree-Ring Data Bank and chronology of total ozone in Arosa, Switzerland. The most strong correlation is observed for such a characteristic as wood density. Negative correlation between chronologies of the mean density and total ozone, such as for Stone Pine, exceeds 0.6 in absolute value. Ozone absorbs UV radiation in the same wavelength range as molecules of living cells. The thinner the ozone layer, the higher the level of solar UV radiation reaching the earth's surface. The UV B radiation causes a shock of vegetation, depressing the growth of its cells. This process has biological consequences for tree rings, allowing the use of dendrochronological series for qualitative reconstruction of total ozone in the growing season of trees (April–September).

1. Черников А.А., Борисов Ю.А., Зуев В.В., Звягинцев А.М., Крученицкий Г.М., Петров С.П. Тенденции изменений озонового слоя по наблюдениям с помощью спутниковой аппаратуры TOMS и наземной озонометрической сети // Исслед. Земли из космоса. 2000. № 6. С. 23–32.
2. Семенов С.М., Кунина И.М., Кухта Б.А. Тропосферный озон и рост растений в Европе. М.: Метеорология и гидрология, 1999. С. 207.
3. Белан Б.Д., Зуев В.В., Складнева Т.К., Смирнов С.В., Толмачев Г.И. О роли суммарного озона в фотохимическом образовании его тропосферной части // Оптика атмосф. и океана. 2000. Т. 13. № 10. С. 928–932.
4. Ваганов Е.А., Шашкин А.В. Рост и структура годовичных колец хвойных. Новосибирск: Наука, 2000. С. 232.
5. Noble Robert J. Ultraviolet-B radiation effects on early growth of conifer seedlings, <http://www.rycomusa.com/aspp1997/45/0442.shtml>
6. Barnes P.W., Flint S.D. and Caldwell M.M. Morphological responses of crop and weed species of different growth forms to ultraviolet-B radiation // Amer. J. Botany. 1999. № 77. С. 1354–1360.
7. <http://www.ngdc.noaa.gov/paleo/tree-ring.html>
8. Kirsi Laakso. Effects of ultraviolet-B radiation (UV-B) on needle anatomy and glutathione status of field-grown pines. Department of Biology, Oulu. Finland, 1999. 49 с.
9. Антонова Г.Ф. Рост клеток хвойных. Новосибирск: Наука, 2001. 232 с.
10. Курдянов А.В. Использование характеристик плотности древесины в дендроклиматологических исследованиях // Сиб. экол. журн. 1999. Т. 6. № 2. С. 193–201.
11. Главные компоненты временных рядов: метод «Гусеница»: Сб. трудов. <http://vega.math.spbu.ru/caterpillar/ru>