

С.Л. Бондаренко, В.В. Зуев, Н.Е. Зуева, М.А. Бондаренко

## Влияние колебаний озоносферы и связанной с ними солнечной УФ-Б-радиации на рост и продуктивность хвойных лесов

*Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск*

Поступила в редакцию 12.11.2004 г.

Предлагается учитывать стрессовое воздействие солнечной УФ-Б-радиации на рост и продуктивность деревьев при ведении рубок и посадок лесных массивов. Это влияние оценивается из результатов прогноза естественной изменчивости озоносферы. Прогноз осуществляется на основе долгопериодных тенденций палеоповедения стратосферного озона за последние 150–200 лет. В результате появилась возможность выявить благоприятные и неблагоприятные периоды для роста и продуктивности хвойных деревьев исследуемого региона. В рамках описанной задачи рассматривается информативность данных космического мониторинга активности растительного покрова (ряды вегетационного индекса NDVI). Приводятся результаты корреляционного анализа временных рядов индексов общего содержания озона и NDVI для хвойных лесов.

### Введение

Изменение уровня ультрафиолетовой солнечной радиации в коротковолновом диапазоне (УФ-Б-радиация) влияет на функционирование лесных экосистем. В больших дозах УФ-Б-радиация приводит к изменению процессов метаболизма, фотосинтеза, повреждает генетический аппарат растения. В свою очередь, изменения уровня УФ-Б-радиации определяются главным образом колебаниями озоносферы, которая поглощает ее основную часть. Таким образом, возникает связь роста и продуктивности лесов с колебаниями озоносферы.

Оценить изменения, происходящие в лесных экосистемах под воздействием УФ-Б-радиации, можно по приросту стволовой части дерева и его фитомассы, с помощью характеристик древесно-кольцевых хронологий прироста хвойных деревьев и вегетационных индексов NDVI, хорошо коррелирующих с продуктивностью лесов.

### Видовые различия связей общего содержания озона и дендрохронологических характеристик хвойных деревьев

Из литературных данных следует, что не все виды растений одинаково чувствительны к УФ-Б-излучению. Среди древесных видов наиболее чувствительны к УФ-Б-излучению хвойные деревья, особенно ель и кедр [1]. В дендроклиматических исследованиях количество собранных хронологий по имеющим хорошо различимую структуру колец видам хвойных деревьев различно. Это связано не только с их физико-химическими свойствами, но и с

подверженностью деревьев к разрушению. Ранее нами было показано, что наибольшей чувствительностью к воздействию УФ-Б-радиации обладают хвойные породы с малой плотностью древесины — ель, пихта и кедр [2–4]. Но эти виды более подвержены разрушению, в частности из-за стволовой гнили. В банках дендрохронологических данных чаще представлены хронологии по сосне и лиственнице. У сосны достаточно широкие, хорошо различимые кольца, а у лиственницы — более продолжительные хронологии. Синхронность дендрохронологических рядов лиственницы также выше, чем у ели и кедра. Поэтому определенный интерес представляют исследования связей общего содержания озона (ОСО) с дендрохронологическими характеристиками лиственницы.

В работах [5–7] показаны различия в чувствительности и синхронности дендрохронологических рядов в зависимости от условий произрастания и видовой принадлежности образцов. Так, например, изменчивость древесно-кольцевых хронологий ели и лиственницы, произрастающих на одном дендроклиматическом участке, для некоторых зон тайги и Алтая может быть не синхронна (коэффициент корреляции  $r = -0,04$ ) и, наоборот, синхронна для низинных пойменных мест Оби ( $r = -0,55$ ). Это свидетельствует о том, что рост ели и лиственницы в разной степени зависит от климатических характеристик. Лиственница по сравнению с елью и сосной показывает более тесную связь размеров клеток (показатель, реагирующий на стресс) с другими характеристиками годичного кольца. Приведенные в этих работах результаты подтверждают вывод о том, что необходима детальная оценка региональных и даже локальных особенностей выбранного дендрохронологического материала для реконструкции ОСО.

В методиках реконструкции временных рядов климатических параметров (температуры и количества осадков) часто используются данные остаточных (с удалением автокорреляции, являющейся результатом условий предшествующих лет) древесно-кольцевых хронологий [6, 7]. Рассмотрим дендрохронологические данные горной местности со сложным ландшафтом и климатическими особенностями (Ароза, Швейцария), для которой имеется самый длинный репрезентативный ряд наблюдений ОСО. Нами был проведен анализ автокоррелограмм (рис. 1) стандартных хронологий плотности и ширины годовых колец различных пород деревьев.

Можно отметить, что в хронологиях максимальной плотности годовых колец кедр автокорреляция практически отсутствует, а для лиственницы она, наоборот, значительна. Для автокоррелограмм хро-

нологий по ширине годовых колец лиственницы и кедр характерна противоположная картина. Ель в этом плане занимает промежуточное положение.

В табл. 1–3 приведены результаты корреляционного анализа временных изменений ОСО по данным наземных наблюдений вблизи Ароза и остаточных хронологий дендрохронологических характеристик сосны, ели и кедр (табл. 1), а также лиственницы для трех хронологий (табл. 2). В табл. 3 приведены коэффициенты корреляции между спутниковыми данными и данными остаточных хронологий лиственницы для Сибири и Урала. Жирным шрифтом выделены существенные значения коэффициентов корреляции. Очевидно, что изменения плотности годовых колец отражают изменения озоносферы в большей степени, чем изменения ширины годового кольца.

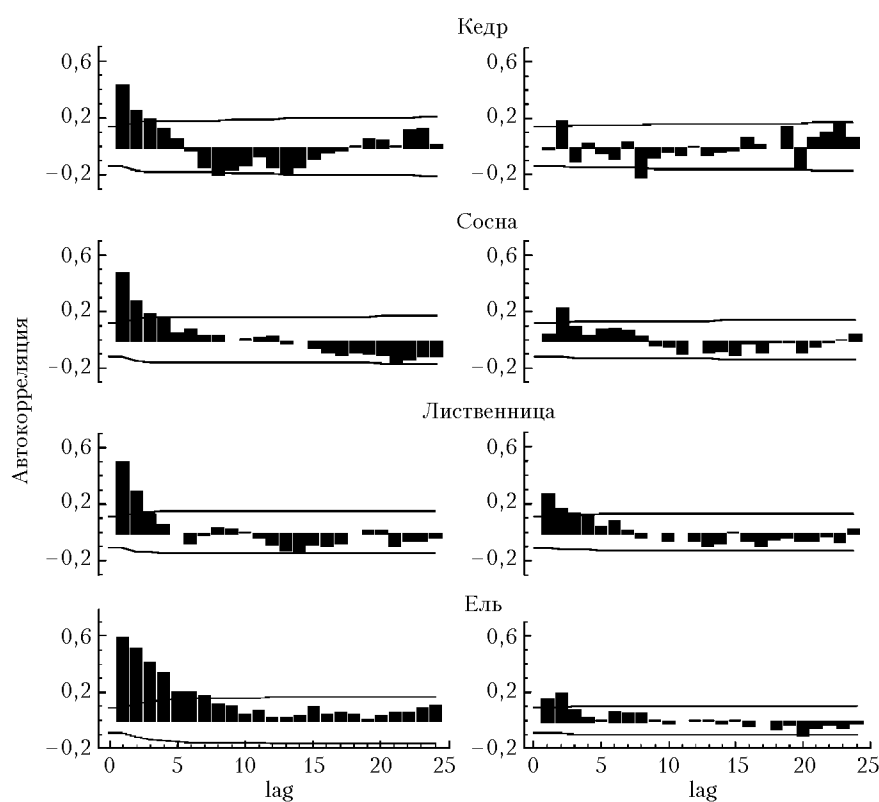


Рис. 1

Таблица 1

Параметр	Коэффициент корреляции ОСО и хронологий вблизи Арозы		
	Сосна 58 точек	Ель 58 точек	Кедр 49 точек
ОСО / ширина годовых колец	0,18 ± 0,24	<0,01	0,33 ± 0,25
ОСО / макс. плотность годовых колец	-0,34 ± 0,22	<b>-0,56 ± 0,29</b>	<b>-0,6 ± 0,2</b>

Таблица 2

Параметры лиственницы	Коэффициент корреляции ОСО и остаточных хронологий вблизи Ароза (58 точек)		
	1	2	3
Макс. плотность годовых колец / ширина годовых колец	<b>0,48</b>	0,16	-0,135
ОСО / ширина годовых колец	<b>-0,54</b>	-0,2	-0,25
ОСО / макс. плотность годовых колец	<b>-0,45</b>	-0,4	<b>-0,52</b>

Таблица 3

Территория	Широта	Долгота	Коэффициент корреляции (14–20 точек)	
			ОСО/плотность годовых колец лиственницы	ОСО/ширина годовых колец лиственницы
Якутия	62°2′	126°7′	–0,17	–0,65
Тыва	50°8′	94°3′	–0,23	–0,7
Урал	57°10′	60°35′	Нет данных	–0,6
Низовья Оби	66°1′	71°7′	–0,84	–0,85

Ширина годовых колец — легко определяемый дендрохронологический параметр, который присутствует во всех базах данных, чего не скажешь о плотности годовых колец. Поэтому особое внимание было уделено анализу связей ОСО с шириной годовых колец остаточных хронологий лиственницы. Результаты анализа показывают, что реконструировать поведение ОСО можно по остаточным хронологиям ширины годовых колец лиственницы, произрастающих в низинных условиях. В большинстве случаев значимая корреляция с ОСО для лиственницы наблюдается при наличии синхронности между ее хронологиями ширины и плотности годовых колец. Наличие такой связи почти всегда справедливо для районов Севера и непредсказуемо для Европы.

### Связь изменений ОСО и вегетационных индексов NDVI

Известно, что данные по вегетационным индексам NDVI хорошо коррелируют с показателями продуктивности лесов. Спутник NOAA/AVHRR позволяет проводить мониторинг растительного покрова по различию в спектральных свойствах хлорофилла в видимом и ближнем ИК-диапазонах. Угнетенная растительность содержит меньше хлорофилла и имеет меньшую отражающую способность в ближнем ИК-диапазоне, чем нормальная. Разность отражающих способностей в двух каналах меняется в течение вегетационного периода и зависит от многих факторов, она максимальна в мае и минимальна в июле. В статье [8] приведен анализ данных вегетационного индекса NDVI (NOAA/AVHRR) для лесов Западной Сибири, из которого следует, что в мае происходит активное изменение индексов NDVI, наименьшее варьирование индексов NDVI наблюдается в летний период, когда происходит максимальное накопление фитомассы, и в сентябре происходит естественное разрушение хлорофилла (пожелтение листьев). Поскольку сезонная динамика индексов NDVI для хвойных практически та же, что и березовых лесов, то на основе данных для березовых лесов была рассмотрена связь средних значений индексов NDVI за май–июль (период интенсивного накопления фитомассы) и средних вариаций ОСО (данные TOMS) с апреля по июль над территорией Западной Сибири (Тюменская область, 57°37′ с.ш. — 72°45′ в.д.). На рис. 2 приведены сглаженные по 2 годам кривые поведения индексов NDVI и вариаций ОСО. Видно, что с увеличением изменчивости ОСО понижаются индексы NDVI. Скорее всего, это связано с замедлением адаптационных механизмов у деревьев, что и приводит к снижению продуктивности лесов. Коэффициент

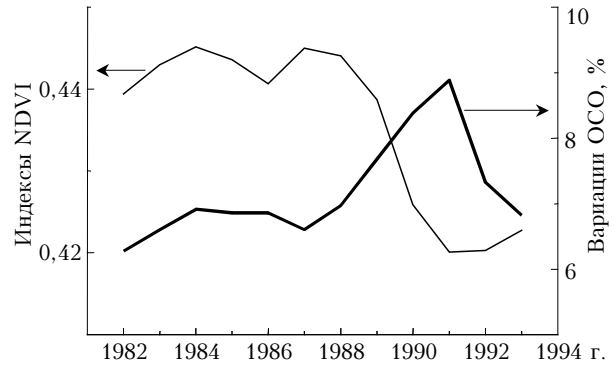


Рис. 2

корреляции рядов ОСО и NDVI составляет  $-0,64$ , при вероятностном уровне  $p < 0,025$ .

### Прогноз тенденций поведения озоносферы и функционирования лесов

Продолжительность жизни деревьев превышает длительность рядов инструментальных физических наблюдений иногда на сотни лет. Получаемая дендрохронологическая информация позволяет выполнять анализ и проводить реконструкции за периоды времени длительностью до нескольких столетий. Знание долгопериодных климатологических тенденций, благоприятных и неблагоприятных для функционирования лесов, может дать положительный эффект, например при разработке мер рационального лесопользования (вырубки и посадки деревьев). Известен ряд экспериментов с результатами положительного воздействия УФ-Б-излучения на молодые саженцы хвойных деревьев [9]. На взрослые деревья увеличение уровня УФ-Б-радиации сказывается угнетающе, его рост замедляется. Поэтому вырубку и посадку лесов оптимальнее проводить в периоды минимальных значений долгопериодных колебаний ОСО.

Влияние колебаний озоносферы и связанной с ними солнечной УФ-Б-радиации на рост и продуктивность хвойных лесов может быть оценено по результатам реконструкции и прогноза естественной изменчивости озоносферы на основе значимой связи ОСО и плотности годовых колец ели, пихты и кедра, а также ширины годовых колец лиственницы [3, 4].

На рис. 3 приведены результаты 30-летнего прогноза ОСО для регионов Северного Урала 61°3′ с.ш. — 59°3′ в.д. (рис. 3,а) и низовья Оби 65°35′ с.ш. — 69°5′ в.д. (рис. 3,б) на основе реконструкций многовекового хода ОСО по плотности годовых колец ели. Прогноз выполнен методом «Гусеница» [10]. Налицо противофазный характер тенденций поведения

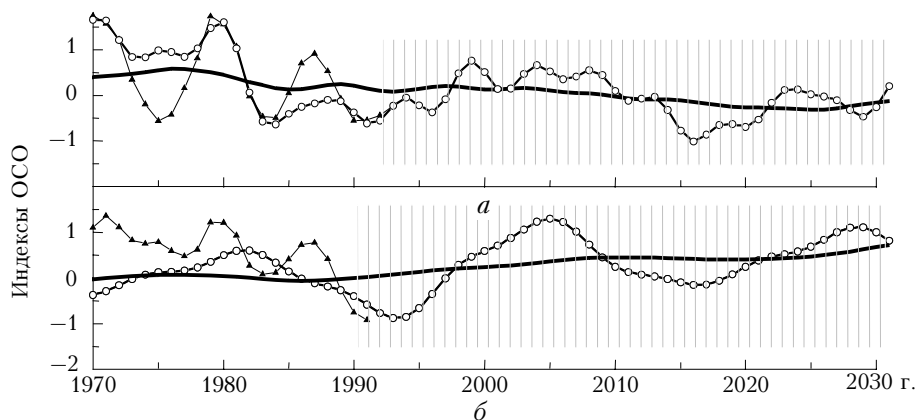


Рис. 3. Результаты 30-летнего прогноза ОСО для Северного Урала и низовьев Оби: линия с треугольниками – реконструированные значения ОСО; линия с кружками – прогноз ОСО; жирная линия – 22-летнее скользящее среднее ОСО. Область прогноза выделена штрихами

индексов ОСО и, соответственно, тенденций роста и продуктивности хвойных лесов в этих двух регионах, расположенных на расстоянии около 700 км друг от друга. Для региона Северного Урала усиливается фаза угнетения роста хвойных лесов. Здесь наступает период, оптимальный для вырубки лесов. Для регионов низовья Оби оптимальны посадки молодых саженцев.

### Заключение

Рассмотренный анализ позволяет сделать следующие выводы:

1. Для северных регионов можно расширить набор используемых для реконструкции палеоповедения ОСО дендрохронологических характеристик, благодаря такому показателю, как ширина годовых колец хронологий лиственницы. Но при выборе этого предиктора ОСО следует более тщательно учитывать региональные и даже локальные особенности дендрохронологического сигнала.

2. Впервые показана значимая связь между временными рядами сезонных вариаций ОСО и индексов NDVI для лесов в южной части Западной Сибири. Эта связь возникает, скорее всего, из-за ослабления адаптационных свойств лесных экосистем с увеличением вариабельности ОСО.

В работе использовались данные, предоставленные сотрудниками лабораторий дендрохронологии ИЛ СО РАН, г. Красноярск, и ИЭРиЖ УрО РАН, г. Екатеринбург, а также данные с серверов <http://www.ngdc.noaa.gov/paleo/treering-wsl.html>, <http://jwocky.gsfc.nasa.gov>.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ № 03-05-65105, РФФИ-Урал

№ 04-04-96016-р2004урал\_а и интеграционного проекта СО РАН № 95.

1. Noble Robert J. Ultraviolet-B radiation effects on early growth of conifer seedlings, <http://www.rycomusa.com/aspp1997/45/0442.shtml>.
2. Зуев В.В., Бондаренко С.Л. Взаимосвязь долгопериодной изменчивости озонового слоя атмосферы с обусловленной УФ-Б-воздействием изменчивостью плотности древесины // Оптика атмосф. и океана. 2001. Т. 14. № 12. С. 1–4.
3. Зуев В.В., Бондаренко С.Л. Реконструкция палеоповедения озонового слоя из дендрохронологических данных с использованием спутниковых данных TOMS // Исслед. Земли из космоса. 2002. №. 6. С. 19–24.
4. Зуев В.В., Бондаренко С.Л. Реконструкция многовекового хода общего содержания озона на основе дендрохронологических данных // Докл. РАН. 2003. Т. 392. № 5. С. 682–685.
5. Ваганов Е.А., Шиятов С.Г., Мазена В.С. Дендрохронологические исследования в Урало-Сибирской Субарктике. Новосибирск: Наука, 1996. 246 с.
6. Лесные экосистемы Енисейского меридиана / Под ред. Ф.И. Плешкова. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2002. 356 с.
7. Овчинников Д.В. Реконструкция изменений климата гор Алтая дендрохронологическими методами: Автореф. дис. ... канд. географ. наук. Иркутск: Ин-т географии, 2002. 18 с.
8. Харин Н.Г., Журин В.М., Татениш П. Возможности использования вегетационного индекса (NDVI) для изучения фенологии и состава лесов Сибири // Исслед. Земли из космоса. 2001. № 1. С. 73–79.
9. Laakso K., Huffunen S. Effects of ultraviolet-B radiation (UV-B) on conifers // Environ. Pollut. 1998. V. 99. P. 313–328.
10. Главные компоненты временных рядов: метод «Гусеница» // Сб. трудов. <http://vega.math.spbu.ru/caterpillar/ru>

S.L. Bondarenko, V.V. Zuev, N.E. Zueva, M.A. Bondarenko. **Influence of variations of the ozone-sphere and the associated solar UV-B radiation on the growth and productivity of coniferous forests.**

In the paper it is proposed to take into account the stress effect of the solar UV-B radiation on the growth and productivity of trees during deforestation and forestation activities. This effect is estimated from results of prediction of natural variability of the ozone-sphere. The prediction is made based on long-period tendencies of paleobehavior of stratospheric ozone over last 150–200 years. As a result, it has been possible to reveal favorable and unfavorable periods for the growth and productivity of coniferous trees over the studied region. As a part of this problem, we consider the information content of data of satellite monitoring of activity of vegetation cover (series of normalized difference vegetation index NDVI). We present the results of correlation analysis of time series of total-ozone indices and NDVI for coniferous forests.

Влияние колебаний озоносферы и ... солнечной УФ-Б-радиации на рост и продуктивность хвойных лесов

123