

РАДИАЦИЯ И БИОСФЕРА

УДК 581.5+581.134.5:581.824.1+582.475+551.510.534

В.В. Зуев, Д.А. Савчук*, Б.Г. Агеев, С.Л. Бондаренко, В.А. Сапожникова

Новый дендрохронологический параметр как результат оптико-акустических измерений концентрации CO₂ в годовых кольцах деревьев

Институт оптики атмосферы СО РАН,

**Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, г. Томск*

Поступила в редакцию 30.11.2005 г.

Из годовых колец спилов деревьев пихты вакуумным способом извлекались газовые пробы, в которых методом лазерной оптико-акустической спектроскопии измерялось содержание CO₂. Полученные серии концентраций CO₂ проанализированы с точки зрения их статистических характеристик и взаимосвязей с временными рядами среднемесячных температур за вегетационный период и общим содержанием озона для г. Томска.

Введение

Дендрохронологические параметры отражают отклик древесного организма на внешние воздействия в период его функционирования в прошлом. Традиционно они получают на основе погодичных измерений размерных и плотностных количественных характеристик годового кольца и его элементов, точно привязанных к календарному году. Полученная таким образом информация о росте дерева не может считаться достаточной, так как неохваченным остается ретроспективная физиолого-биохимическая активность древесного организма. В [1, 2] с помощью лазерной фотоакустической спектроскопии было обнаружено, что в газовых пробах, взятых из годовых колец спилов деревьев, содержание CO₂ (ppm) (остаточный CO₂) выше, чем в воздухе. Нами было высказано предположение о возможности использования этой информации в дендрохронологических исследованиях. Цель настоящей работы – построить погодичные серии содержания остаточного углекислого газа в годовых кольцах деревьев, проанализировать их статистические характеристики и выявить связи этих серий с шириной кольца и внешними факторами.

Материалы и методы

Исследования проводились на 10 спилах пихты (нумерация деревьев hp11–hp20), взятых в 100-летнем мертвопокровном пихтарнике в 40 км к востоку от г. Томска, и трех спилах кедра из елово-кедрово-лиственничного редколесья, разнотравного на юго-западном склоне Семинского хребта, Республика Алтай. Последние спиловы были взяты на высоте 70–80 см от поверхности земли. Ширина годовых колец измерялась на зашлифованных поверхностях спилов по двум радиусам на полуавтоматической установке LINTAB с точностью 0,01 мм.

Из каждого годового кольца за последние 24–29 лет этих спилов по отработанной методике [1, 2] извлекался и измерялся остаточный CO₂.

Все индивидуальные древесно-кольцевые ряды стандартизировались с помощью отрицательной экспоненты или линейной функции, а также авторегрессионного моделирования для получения в итоге стандартных (Std) и остаточных (Res) серий (хронологий), в первой из которых сведена к минимуму возрастная составляющая, во второй – автокорреляционная. Такие серии усреднялись в обобщенные хронологии. При этом определялись: коэффициенты чувствительности и автокорреляции 1 порядка и стандартное отклонение [3]. Аналогичным способом обрабатывались хронологии содержания остаточного CO₂ в годовых кольцах. Корреляционный анализ выполнялся методом ранговой корреляции по Спирмену с помощью пакета Statistica для Windows.

Для сравнения полученных серий по CO₂ с внешними факторами использовались данные по общему содержанию стратосферного озона (СО₃), температуры воздуха и осадков по г. Томску за 1979–2004 гг.

Результаты

Подходя к измерениям содержания углекислого газа в кольцах ксилемы, было необходимо получить ответ на вопрос: зависит ли концентрация остаточного CO₂ в годовых кольцах 1) от месторасположения взятого спила на стволе дерева и 2) радиального направления на спиле.

Для ответа на первый вопрос остаточный CO₂ извлекался из спилов ствола кедра, взятых на высотах 0,5 (в), 10,5 (б) и 18 м (а) от земли (спилов хранились при комнатных условиях 6 лет). Полученные индивидуальные ряды концентраций газа (рис. 1) оказались синхронными (коэффициент синхронности 60–76%) и хорошо коррелирующими

друг с другом (коэффициент корреляции $R = 0,63-0,75$).

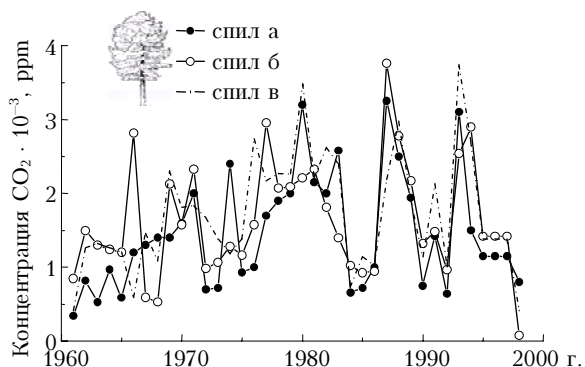


Рис. 1. Изменчивость концентрации CO_2 в годичных кольцах дерева кедра в зависимости от месторасположения спилов на стволе

При ответе на второй вопрос случайным образом был выбран спил пихты hr15, из каждого кольца которого извлекался остаточный CO_2 по четырем радиальным направлениям (рис. 2). И здесь значения погодичных концентраций газа достаточно высоко синхронны (76–85%) и скоррелированы ($R = 0,30-0,70$) между собой.

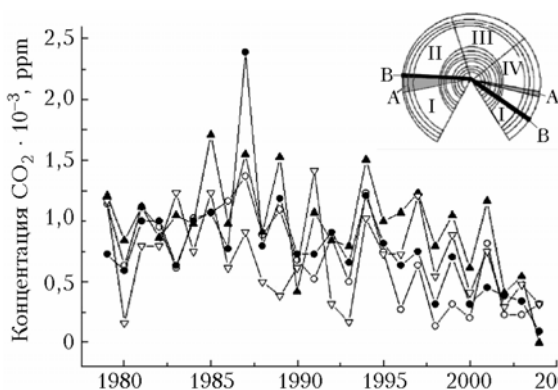


Рис. 2. Изменчивость концентрации CO_2 в годичных кольцах спилов пихты hr15 по различным радиальным направлениям: \circ – I, \bullet – II, \blacktriangle – III, ∇ – IV. А – область сучков; В – область измерения ширины годичных колец

Таким образом, содержание остаточного углекислого газа в древесине годичных колец деревьев можно считать независимым от месторасположения спилов на стволе и радиального направления на спиле. Поэтому в дальнейшем извлечение остаточного CO_2 из колец ксилемы спилов деревьев пихты проводилось по тем же двум радиальным направлениям, что и измерение ширины колец.

Для каждого дерева была построена индивидуальная серия измеренных погодичных концентраций CO_2 (ppm) (обозначены номером дерева hr11 – hr20 в таблице). Затем эти серии преобразовывались для получения стандартной (Std) и остаточной (Res) индексной хронологии для каждого дерева. Таким образом, всего имелось 30 серий, у которых были подсчитаны статистические характеристики, представленные в таблице. Например, значения

стандартных отклонений серий экспериментальных измерений CO_2 варьируются от 0,086 до 0,674, а коэффициентов чувствительности – от 0,327 до 0,613 (достаточный уровень 0,2). Индексы Std-серии имеют значительную автокорреляционную составляющую. Причинами этого, видимо, следует считать физиологические процессы, которые связаны с запасом, транспортом и использованием продуктов фотосинтеза [4], а также с длительным воздействием почвенных, фитоценологических, климатических и других факторов [5]. По наличию автокорреляции можно предположить, что CO_2 в некоторой степени диффундирует из одного годичного кольца в соседнее. В индивидуальных Res-сериях, по сравнению со стандартными, дисперсия немного снижается, а чувствительность на 8–25% повышается. Таким образом, в индивидуальных рядах концентраций газа, как стандартных, так и остаточных, можно предположить наличие климатического сигнала.

Статистические характеристики индивидуальных серий содержания остаточного CO_2 в годичных кольцах пихты

Серия	Интервал	Кол-во лет	Чувствительность	Стандартное отклонение	Автокорреляция I порядка
hp11	1977–2004	28	0,470	0,165	0,32
Std	1977–2004	28	0,469	0,476	0,34
Res	1978–2004	27	0,514	0,435	–0,02
hp12	1977–2004	26	0,357	0,086	0,05
Std	1977–2004	26	0,358	0,318	0,01
Res	1980–2004	25	0,320	0,295	0,01
hp13	1979–2004	26	0,327	0,178	0,38
Std	1979–2004	26	0,326	0,380	0,33
Res	1980–2004	25	0,378	0,365	0,05
hp14	1976–2004	29	0,613	0,674	0,46
Std	1976–2004	29	0,629	0,820	0,42
Res	1977–2004	28	0,787	0,561	–0,34
hp15	1979–2004	26	0,525	0,162	0,40
Std	1979–2004	26	0,530	0,426	–0,14
Res	1980–2004	25	0,487	0,430	0,00
hp16	1981–2004	24	0,459	0,405	–0,01
Std	1981–2004	24	0,455	0,803	–0,14
Res	1982–2004	23	0,490	0,813	–0,02
hp17	1979–2004	26	0,597	0,152	0,19
Std	1979–2004	26	0,596	0,480	0,18
Res	1980–2004	25	0,666	0,484	–0,06
hp18	1979–2004	26	0,465	0,122	0,18
Std	1979–2004	26	0,465	0,452	0,17
Res	1980–2004	25	0,502	0,450	0,05
hp19	1979–2004	26	0,557	0,132	–0,26
Std	1979–2004	26	0,557	0,544	–0,27
Res	1981–2004	24	0,386	0,432	–0,04
hp20	1979–2004	26	0,335	0,321	0,41
Std	1979–2004	26	0,333	0,383	0,23
Res	1980–2004	25	0,367	0,370	–0,10

Обращают на себя внимание статистические характеристики дерева hr14 (см. таблицу). В его остаточной индивидуальной серии велика автокорреляция ($-0,34$) при высокой чувствительности ($0,787$) и стандартном отклонении ($0,561$). За последние 25 лет это дерево приросло на 134 мм (средняя ширина кольца за этот период составляет $5,4$ мм в год). Это самый высокий темп прироста среди изучаемых деревьев. При анализе истории роста и развития этого дерева на основе графика прироста по площади поперечного сечения ствола в полулогарифмической шкале (см. [6]) обнаруживается, что его рост до 1980 г. был крайне угнетен, скорее всего соседними деревьями. По-видимому, с 1980 г. фитоценогическая обстановка возле дерева резко улучшилась и пихта hr14 стала резко набирать стволовую биомассу. С этого времени интенсивный рост вызвал у дерева усиленный приток пластических веществ к точкам роста, что нарушило баланс в распределении запасных пластических веществ и продуктов текущего фотосинтеза между метаболитами разного функционального назначения [7]. Это привело к неадекватному отклику древесного организма на внешние воздействия в этот период.

Для анализа взаимосвязей остаточного CO_2 в годичных кольцах деревьев с другими параметрами далее используются хронологии остаточного содержания CO_2 , полученные усреднением индивидуальных серий после отбраковки случайных выбросов и измерений для пихты hr14 с ее неадекватным откликом, что соответствует в дендрохронологии понятию «остаточная обобщенная хронология». Связи такой обобщенной хронологии содержания CO_2 с временными рядами температуры и осадков за вегетационный период для г. Томска статистически не значимы (R составляет от $-0,10$ до $-0,27$), но проявляются более сильно при сдвиге 2 года. Так, средняя температура за февраль–ноябрь предыдущих 2 лет тесно связана с содержанием остаточного CO_2 в годичных кольцах деревьев ($R = -0,82$). Очевидно, чем выше температура, тем более активно идут процессы в дереве и тем меньше биологически активных веществ может запасаться.

Мы сравнили изменчивость остаточной концентрации углекислого газа в годичном кольце с его шириной (рис. 3). Для этого экспериментальные данные преобразованы в относительные индексы.

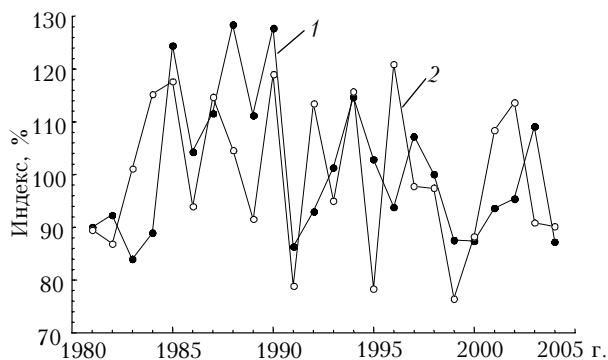


Рис. 3. Обобщенные Res-хронологии содержания CO_2 и ширины годичных колец пихты: 1 – CO_2 ; 2 – ширина

Наблюдаемая связь ($R = 0,40$) между ними невелика. Эти параметры имеют различную природу и, видимо, степень их зависимости от внешних воздействий различна. Тем не менее концентрация газа связана с шириной кольца предыдущих двух лет роста. Максимальное значение $R = 0,61$ отмечено при сдвиге рядов на 2 года. Возможно, происходит частичное перемещение газа в пределах двух соседних колец ксилемы. Так, в опытах с меченым углеродом C^{14}O_2 было показано, что наибольшая его концентрация сосредоточена в прилегающих к коре нескольких годичных кольцах, исключая кольцо текущего года [8]. Хотя в опытах речь идет о растущем дереве, можно предположить, что такое распределение CO_2 консервируется в спилах. Таким образом, можно считать, что активный транспорт CO_2 идет не по кольцу текущего года, а по предыдущим кольцам.

Сравнивая остаточные концентрации углекислого газа в ксилеме с общим содержанием стратосферного озона за вегетационный сезон, выраженные в индексах (рис. 4), видим, что связь между ними остается на том же уровне ($R = 0,59$ при вероятностном уровне $p < 0,002$), но сдвиг рядов больше – 3 года.

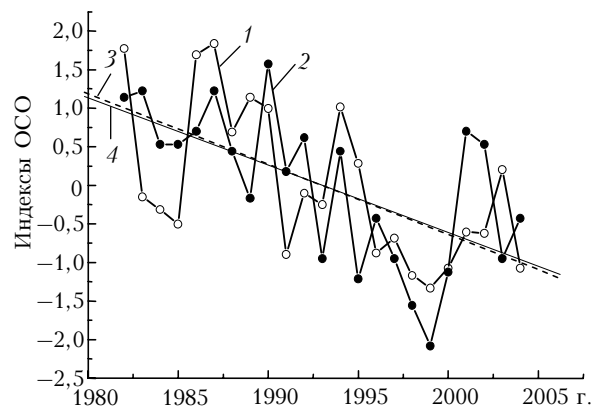


Рис. 4. Обобщенная хронология содержания CO_2 в годичных кольцах пихты и серия средних (апрель–август) значений общего содержания озона: 1 – CO_2 ; 2 – OCO ; 3 – тренд OCO ; 4 – тренд CO_2

Вероятно, этот фактор через цепочку «стратосферный озон–ультрафиолетовая радиация–тропосферный озон» кумулятивно влияет на протекание физиолого-биохимических процессов в растении, что отражается на содержании углекислого газа в древесине как запасного пластического вещества.

Заключение

Статистическая обеспеченность данных измерений позволяет рассматривать погодичное содержание остаточного углекислого газа в древесине годичных колец деревьев как новый дендрохронологический параметр, который в комплексе с размерными и плотностными дендрохронологическими характеристиками кольца позволит глубже изучить отклик древесного организма на внешние воздействия,

понять изменение его состояния и физиолого-биохимических функций в прошлом.

Концентрация CO₂ в ксилеме не зависит от места отбора образцов на стволе и радиального направления на спиле. Основные статистические характеристики индивидуальных серий содержания газа показывают, что в них имеется климатический сигнал. Временная изменчивость концентрации углекислого газа связана как с шириной соответствующего годичного кольца, так и с общим содержанием озона.

Исследования велись при финансовой поддержке грантов РФФИ (№ 03-05-65105, 05-05-98003р_объ_а) и Интеграционного проекта СО РАН (№ 95).

1. Агеев Б.Г., Несветайло В.Д., Пономарев Ю.Н., Сапожникова В.А. Измерение эмиссии CO₂ древесной годичных колец // Оптика атмосф. и океана. 2002. Т. 15. № 9. С. 766–767.
2. Агеев Б.Г., Несветайло В.Д., Пономарев Ю.Н., Сапожникова В.А. Дендрохроноиндикация с использо-

ванием газоанализа // Сиб. экол. ж. 2005. № 1. С. 61–65.

3. *Methods of dendrochronology: Applications in the environmental sciences* / E.R. Cook, L.A. Kairukstis, eds. Dordrecht; Boston; London: Kluwer Acad. Publ., 1990. 394 p.
4. *Fritts H.S.* Tree rings and climate. London: Acad. Press, 1976. 245 p.
5. Арбатская М.К., Ваганов Е.А. Многолетняя изменчивость частоты пожаров и прироста сосны в средней подзоне тайги Средней Сибири // Экология. 1997. Т. 28. № 5. С. 330–336.
6. Николаева С.А., Савчук Д.А. Биологические и экологические факторы роста кедров сибирского в бассейне среднего течения Оби // Эколого-биохимические исследования в бассейне Оби. Томск: Изд-во «РАСКО», 2002. С. 328–350.
7. Ладейщикова Е.И. О причинах возникновения очагов корневой гнили в молодняках сосны после проведения рубок ухода // Лесоведение. 1986. № 4. С. 56–62.
8. Судаchkova Н.Е. Метаболизм хвойных и формирование древесины. Новосибирск: Наука, 1977. 232 с.

V.V. Zuev, D.A. Savchuk, B.G. Ageev, S.L. Bondarenko, V.A. Sapozhnikova. A new dendrochronological parameter as a result of optoacoustic measurements of CO₂ concentration in annual tree rings.

CO₂ content of gas probes vacuum extracted from annual tree rings of fir stem disks were measured by the laser optoacoustic spectroscopy method.

The measured time series of CO₂ concentration were analyzed in terms of their statistical characteristics and relations with time series of mean month air temperatures for the growing season and total ozone over Tomsk.