

РАДИАЦИЯ И БИОСФЕРА

УДК 581.5+581.134.5:581.824.1+582.475+551.510.534

Вариации и тренды содержания CO₂ и H₂O в кольцах спилов хвойных деревьев

Б.Г. Агеев¹, А.Н. Груздев², Г.В. Матяшенко³, Д.А. Савчук⁴,
В.А. Сапожникова¹, Ю.Н. Пономарев^{1*}

¹Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

²Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН
119017, г. Москва, пер. Пыжевский, 3

³Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН
664033, г. Иркутск, ул. Фаворского, 1а

⁴Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН
634021, г. Томск, пр. Академический, 10/3

Поступила в редакцию 8.07.2012 г.

Приводятся данные об изменении содержания CO₂ и H₂O в годичных кольцах спилов хвойных деревьев из районов с различными климатическими условиями, проводится сравнение этих данных с шириной годичного кольца, делаются выводы относительно климатического отклика в погодичных распределениях CO₂ и H₂O. Выдвигается гипотеза, что появление долгопериодных циклов в распределениях CO₂ по годичным кольцам является реакцией деревьев на изменение условий окружающей среды.

Ключевые слова: CO₂, цикличность, годичные кольца, лазерный фотоакустический газоанализ, климатический отклик; CO₂, cyclicity, tree rings, laser photoacoustic gas analysis, climatic response.

Введение

Рост концентрации атмосферного CO₂ вызывает повышенный интерес в научном мире из-за его возможного влияния на растительность, в частности на леса. Уже к 2006 г. влияние избыточного CO₂ на растения было предметом исследования нескольких тысяч научных статей и приблизительно 120 обзоров [1]. Так как углерод, идущий на построение древесины, появляется в деревьях исключительно из атмосферного CO₂, ассимилируемого ими через листья [2], то увеличение атмосферного CO₂ должно было бы приводить к изменениям некоторых параметров растений, в частности к увеличению прироста или изменению дыхания растения.

Огромное количество работ связано с определением влияния избыточного CO₂ на дыхание растений, в том числе на определение скорости дыхания древесной растительности. Дыхание стволов является важным компонентом бюджета углерода лесного древостоя, на который может повлиять рост содержания атмосферного CO₂ [3]. Изучение влияния избыточного CO₂ на растения обычно проводят с по-

мощью ростовых камер: молодые деревья помещаются в экспозиционные камеры, в которые подается избыточный CO₂, на стволы деревьев крепятся датчики температур и инфракрасные анализаторы выдыхаемого стволом CO₂, и результаты измерений сравниваются с показателями датчиков на контрольных деревьях, растущих в естественных атмосферных условиях. Известно, что в отличие от атмосферного CO₂, концентрация которого составляет 0,04%, содержание CO₂ в стволе может иногда превышать 20%. CO₂ в стволе образуется в результате дыхания живых клеток ствола и корней и имеет иное значение отношения изотопов углерода, чем атмосферный. Считается [4], что весь образованный в стволе CO₂ диффундирует в атмосферу, его количество является дыханием ствола и именно его измеряют датчики, закрепленные на стволах деревьев. Однако проводимые много десятилетий измерения не дают однозначного ответа на вопрос, как влияет рост содержания атмосферного CO₂ на растения, в частности на древесные. Не существует однозначного ответа и на вопрос, каков эффект длительного воздействия избыточного CO₂ на растения; считается, например, что увеличение содержания CO₂ в атмосфере приводит к изменению фотосинтеза [5].

Результаты наших исследований содержания CO₂ в годичных кольцах спилов деревьев по предложенной нами методике [6, 7] показали, что в стволе сохраняется значительная часть CO₂, образуемая

* Борис Григорьевич Агеев; Александр Николаевич Груздев; Григорий Васильевич Матяшенко; Дмитрий Анатольевич Савчук (savchuk@imces.ru); Валерия Александровна Сапожникова (sapo@asd.iao.ru); Юрий Николаевич Пономарев (yuron@iao.ru).

при дыхании клеток. Содержание этого CO_2 в большинстве случаев превышает содержание CO_2 в атмосфере и образует распределение по годичным кольцам в древесине, коррелирующее в ряде случаев с ростом содержания атмосферного CO_2 . Кроме того, было показано, что в распределении CO_2 в кольцах спилов хвойных можно выделить 4- и 2-летний циклы, на которые накладываются многолетние вариации [8, 9].

Используемый нами метод лазерной фотоакустической спектроскопии давно и успешно используется во многих приложениях [10–14]. Метод обладает высокой чувствительностью, например при использовании CO_2 -лазера в качестве источника излучения можно определять содержание аммиака, этилена или метанола на уровне «ppb» [15]. В настоящей статье сравниваются погодичные распределения содержания CO_2 , полученные методом фотоакустической спектроскопии, в спилах хвойных деревьев, взятых из разных местообитаний (равнинных и горных), делаются выводы относительно климатического отклика в распределениях.

Результаты измерений могут представлять интерес для дендрохронологов, дендрэкологов, различных специалистов, занимающихся проблемами баланса углерода и оценкой потоков CO_2 между земными экосистемами и атмосферой [16].

Материалы и методы

Исследование содержания CO_2 и H_2O в годичных кольцах было проведено для спилов сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), лиственницы сибирской (*Larix sibirica* Ledeb.) и кедра сибирского (*Pinus sibirica* Du Tour).

Спил сосны был взят возле с. Большое Голоустное (52°02' с.ш., 105°24,5' в.д., Иркутская обл., северо-западное побережье Южного Байкала). Модельное дерево произрастало в молодом сосновом лесу, диаметр дерева 24 см, возраст 70 лет, 56 колец на спиле. Спил лиственницы был получен возле пос. Черноруд (53°00' с.ш., 106°43' в.д., Иркутская обл., северо-западное побережье Среднего Байкала). Дерево росло в молодом лиственничном лесу, диаметр дерева 23 см, возраст 95 лет, 69 колец на спиле. Спил кедра был взят на юго-западном склоне Семинского хребта (50°04' с.ш., 87°45' в.д., 1650 м над ур.м., Республика Алтай). Дерево произрастало в смешанном хвойном лесу, диаметр дерева 54 см, возраст 130 лет, 107 колец на спиле. Полученные результаты по содержанию CO_2 в кольцах спила сравнивались с данными по погодичному содержанию CO_2 в спиле кедра Западно-Сибирской равнины (56°26' с.ш., 85°03' в.д., Томская область, Трубачевский припоселковый кедровник, диаметр дерева 66 см, возраст 150 лет, 132 кольца на спиле).

Места обитания деревьев, с которых были взяты спилы, различаются по климатическим условиям, абсолютной высоте, почвенным условиям, рельефу и т.п. Например, Семинский перевал (Горный Алтай) – район взятия спила кедра – является самым высоким из всех перевалов Алтая (1750 м). Климат

района резко континентальный. Среднегодовая температура воздуха $-1,1^\circ\text{C}$. Средняя температура июля $+16,2^\circ$, января $-22,1^\circ$. Юг Западно-Сибирской равнины, наоборот, имеет ровный рельеф, без резких перепадов высот (до 200 м над ур.м.). Резко континентальный климат района формируется отчасти под обогревающим влиянием рек Оби и Томи. Среднегодовая температура составляет $-0,6^\circ\text{C}$, средняя температура июля $+18,1^\circ\text{C}$, средняя температура января $-19,2^\circ\text{C}$.

Приольхонье, где располагается пос. Черноруд, – самое сухое место Прибайкалья: радиационный индекс сухости соответствует сухим степям. В отдельные годы в начале вегетационного периода (май–июнь) осадков вообще нет, что сказывается на приросте деревьев. В целом ведущими факторами для роста и развития древесных растений в районах исследований являются климатические (солнечная радиация, сумма эффективных температур, продолжительность вегетационного сезона, резкие изменения элементов погоды в сравнительно короткие периоды времени, поздневесенние и раннелетние заморозки) и рельеф (его форма, экспозиция, крутизна и т.п.).

Все спилы для анализа брались на высоте 1,3–1,5 м от земли и до измерений хранились в лабораторных условиях, т.е. древесина считается комфортно-сухой.

Содержание CO_2 в пробах, извлеченных вакуумным методом из колец, измерялось на лазерном фотоакустическом газоанализаторе, который давно и успешно применяется для решения широкого круга задач газоанализа. В работе использовались стандартная схема спектрометра и стандартная процедура измерений, которые были неоднократно описаны [6–8]. Источником ИК-излучения служил волноводный CO_2 -лазер с высокочастотным (ВЧ) возбуждением.

Перестройка длины волны излучения осуществлялась поворотом дифракционной решетки (150 штр./мм), установленной в прецизионном поворотном узле. Лазер генерировал в полосах 10 и 9 мкм более чем на 70 линиях P- и R-ветвей при выходной мощности генерации до 3 Вт на сильных линиях и до 0,5 Вт на слабых. Излучение модулировалось по амплитуде и перед направлением в ячейку фотоакустического детектора ослаблялось ИК-ослабителями (Ge, BaF_2) до мощности ~ 70 мВт. Режим модуляции определялся амплитудной модуляцией мощности накачки ВЧ-генератора лазера. Для измерения фотоакустического сигнала поглощения U использовался фотоакустический детектор нерезонансного типа, состоящий из микрофонной камеры, где размещался самодельный конденсаторный микрофон, и присоединенной к ней цилиндрической газовой ячейки ($\varnothing 10 \times 100$ мм) с окнами из BaF_2 . Для повышения отношения сигнал-шум детектора была выбрана низкая частота модуляции излучения, равная 123 Гц. Мощность излучения W измерялась с помощью фотоприемника, также работающего на основе фотоакустической регистрации, но вместо газовой ячейки использовалась камера, содержащая неселективный поглотитель –

зачерненную металлическую фольгу. Сигналы микрофонов детектора и фотоприемника подавались сначала на широкополосные предусилители, а затем на систему измерения и регистрации на базе звуковой карты персонального компьютера.

Перестройка длины волны излучения, измерение сигналов детекторов, их предварительная обработка (усреднение, определение отношений) осуществлялись с помощью специально разработанной компьютерной программы. Результатом измерения являлся файл с записью значений $A = U/W$ на соответствующих линиях генерации, т.е. аналог спектра поглощения пробы. Информация о спектре отображалась также на мониторе персонального компьютера, с помощью которого происходило управление спектрометром.

Перед измерениями с помощью поверочной смеси $\text{CO}_2 + \text{N}_2$ осуществлялась калибровка всей системы. Ячейка детектора заполнялась поверочной смесью с известными концентрациями CO_2 , и на выбранных линиях генерации сопоставлялись значения A и концентрации CO_2 используемой смеси.

Эксперимент проводился следующим образом. Образцы древесины четырех годовичных колец помещались в четыре экспозиционные камеры, в которых создавался кратковременный вакуум для выхода сорбированных древесиной газов, и через 20–30 мин проводились измерения [6, 7]. Во всех измерениях проба газа из каждой экспозиционной камеры ($P = 6-8$ торр) запускалась в вакуумизированную фотоакустическую ячейку и добавлялся воздух для создания общего давления 100 торр в ячейке, при котором достигалась максимальная чувствительность фотоакустического детектора. Каждая серия измерений A_{ring} для анализируемых проб сопровождалась измерениями величин A_{air} фонового поглощения воздуха. Информационной являлась величина $\Delta A = A_{ring} - A_{air}$, по которой с помощью калибровочного графика находилось относительное содержание CO_2 в пробе для каждого кольца. Измерения проводились на четырех линиях генерации перестраиваемого CO_2 -лазера: $10P(20, 16, 14)$, совпадающих с линиями поглощения CO_2 , и $10R(20)$, совпадающей с линиями поглощения CO_2 и паров H_2O . Коэффициенты поглощения H_2O в области линий генерации $10P(20, 16, 14)$ во много раз меньше, чем коэффициенты поглощения CO_2 на этих линиях [18], поэтому мы считаем, что вклад паров H_2O в поглощение на линиях $10P(20, 16, 14)$ для наших условий эксперимента незначителен.

Ширина годовичных колец на зашлифованной поверхности спила измерялась на полуавтоматической установке LINTAB с точностью 0,01 мм.

Результаты измерения содержания CO_2 в годовичных кольцах спилов

Полученные результаты по содержанию CO_2 в годовичных кольцах спилов, взятых в районах Байкала и Семинского хребта, представлены на рис. 1–5, и для сравнения приводятся данные по содержанию CO_2 в спиле, взятом под Томском [7] (рис. 6).

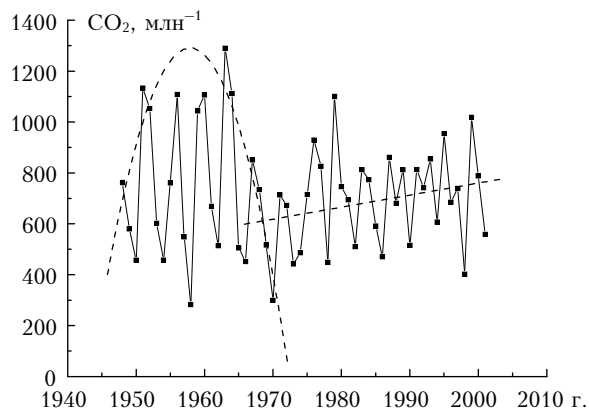


Рис. 1. Погодиные вариации содержания CO_2 в кольцах спила сосны (с. Б. Голоустное, Байкал)

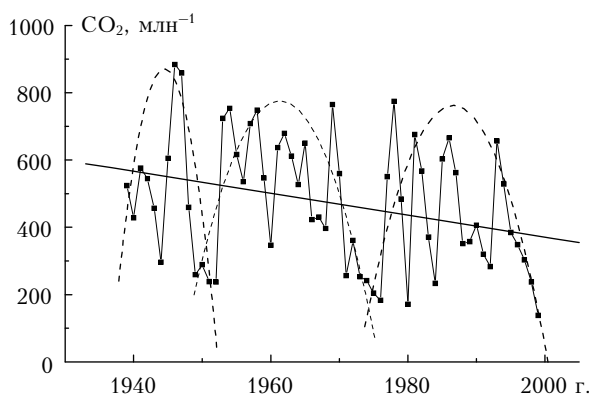


Рис. 2. Погодиные вариации содержания CO_2 в кольцах спила лиственницы (пос. Черноруд, Байкал)

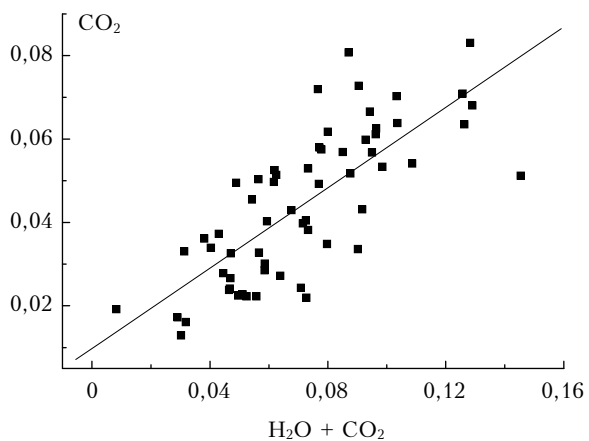


Рис. 3. Линейная корреляция между сигналами от ($\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$) и CO_2 для спила лиственницы (пос. Черноруд, Байкал)

Все результаты по содержанию CO_2 в кольцах являются средним из трех измерений на трех длинах волн, коэффициент корреляции между измеренными значениями равен 0,85–0,9.

Как видно из рис. 1, в спиле сосны (село Б. Голоустное) содержание CO_2 превышает атмосферное CO_2 и наблюдается характерное распределение CO_2 с максимумом в 1957–1958 гг. Можно отметить последующий положительный тренд CO_2 , который

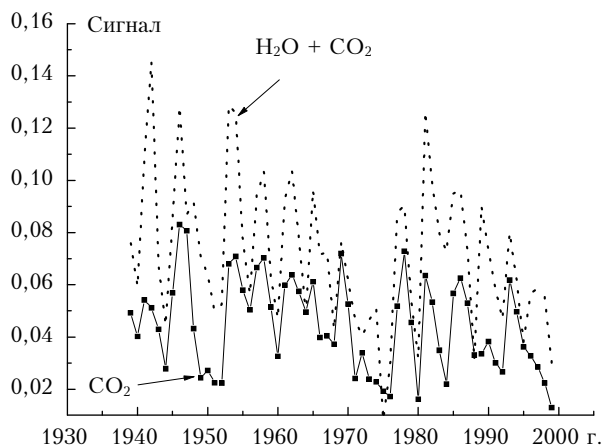


Рис. 4. Вариации сигналов от $(H_2O + CO_2)$ на линии генерации $10R(20)$ и средние из измерений на 3 частотах данные по CO_2 для лиственницы

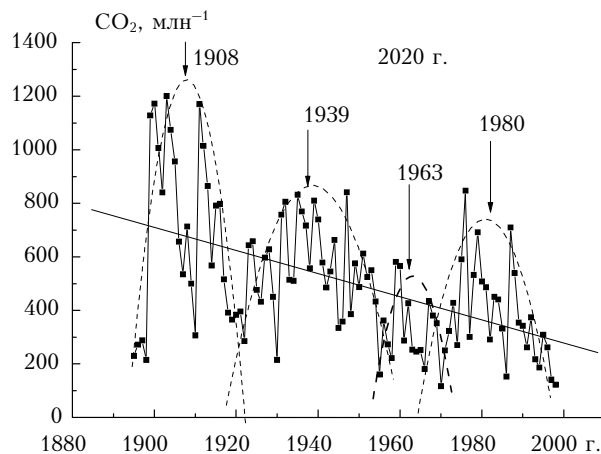


Рис. 5. Погодичные вариации содержания CO_2 в кольцах спила кедра с Семинского хребта

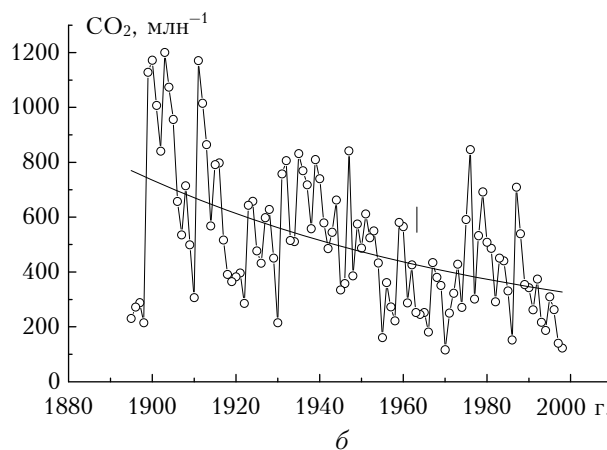
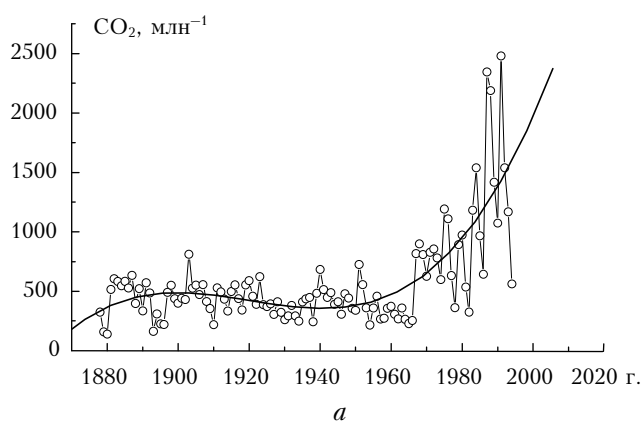


Рис. 6. Сравнение погодичных трендов CO_2 по кольцам «томского» кедра (а) и кедра с Семинского хребта (б)

свидетельствует о повторном накоплении CO_2 в кольцах. Кроме того, спил «байкальской» сосны характеризуется отчетливой 4-летней цикличностью распределения CO_2 в кольцах (аналогичная картина наблюдалась и в спиле молодой сосны, Томск [8, рис. 7]).

Измерения содержания CO_2 в коре сосны показали, что концентрация CO_2 в ней близка к содержа-

нию CO_2 в первом подкорковом кольце 2001 г. Был определен коэффициент корреляции между сигналом на частоте генерации лазера $10R(20)$ для $(H_2O + CO_2)$ и сигналом от CO_2 (среднее из измерений на трех длинах волн): $R = +0,50$, $N = 43$, $P = 5,12 \cdot 10^{-4}$. Между содержанием CO_2 в кольцах и шириной годовичного кольца найдена достоверная отрицательная корреляция: $R = -0,38$, $N = 43$, $P = 0,012$. Отметим,

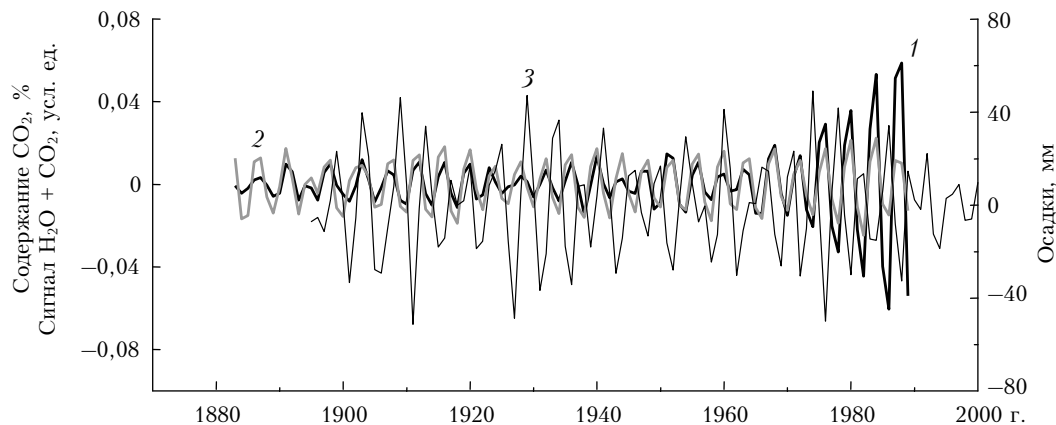


Рис. 7. Четырехлетние компоненты вейвлет-преобразований содержания CO_2 , сигнала $(H_2O + CO_2)$ (1 и 2 соответственно; левая вертикальная ось) и количества осадков в период покоя (3, правая вертикальная ось)

что для этого спила существует достоверная отрицательная линейная корреляция между сигналом от ($H_2O + CO_2$) и шириной годичного кольца: $R = -0,40$, $N = 43$, $P = 0,00794$.

Для спилов лиственницы с Байкала (см. рис. 2) и кедра с Семиринского хребта (см. рис. 5) были получены иные результаты.

В спиле лиственницы содержание CO_2 было измерено в 61 кольце. В коре спила содержание CO_2 было почти в 2 раза ниже, чем в первом подкорковом кольце 1999 г. Распределение CO_2 в кольцах можно приблизительно сгруппировать по трем участкам, ограниченным полиномиальными кривыми 2-го порядка, которые приблизительно указывают на год максимального значения CO_2 в этом распределении: 1944, 1961 и 1987.

Из рис. 2 видно, что в содержании CO_2 присутствуют 3- и 4-летние циклы, а тренд содержания CO_2 отрицательный. Если весь период измерений разбить на два временных отрезка 1939–1975 и 1975–1999 гг., то для первого из них выявится слабая положительная корреляция между шириной колец и содержанием CO_2 ($R = +0,25$, $N = 36$, $P = 0,1319$), а для второго – слабая отрицательная корреляция ($R = -0,26$, $N = 25$, $P = 0,2$).

Сопоставление сигналов на линии $10R(20)$ для ($H_2O + CO_2$) с данными для CO_2 , усредненными по 3 линиям генерации, показывает (см. рис. 3 и 4), что между ними наблюдается достоверная корреляция: $R = +0,76$, $N = 61$, $P < 0,0001$. Это говорит о том, что мы при вакуумировании извлекаем в основном растворенный в воде CO_2 .

Сравнение сигналов в коре и в первом подкорковом кольце (1999 г.) показало, что сигнал от ($H_2O + CO_2$) в коре лиственницы с Байкала был в 3 раза выше, чем в кольце.

На рис. 5 представлены результаты измерения содержания CO_2 в кольцах кедра с Семиринского хребта. Полученное распределение CO_2 похоже на распределение CO_2 по кольцам для лиственницы (пос. Черноруд): в содержании CO_2 присутствуют 3- и 4-летние циклы, а тренд содержания CO_2 – отрицательный. Все данные можно сгруппировать по четырем временным отрезкам: трем отчетливым и одному слабозаметному (с максимумом приблизительно в 1963 г.). Кроме того, имеется четкая тенденция к уменьшению содержания CO_2 в кольцах с возрастом. Коэффициент корреляции между сигналами от CO_2 в кольцах и сигналами от ($H_2O + CO_2$) также оказался достоверно высоким: $R = +0,85$, $N = 104$, $P < 0,0001$. В период 1960–1998 гг. ширина кольца и содержание CO_2 изменяются в «противофазе» друг с другом, коэффициент достоверной корреляции – отрицательный: $R = -0,35$, $N = 39$, $P = 0,03109$, т.е. чем больше содержание CO_2 , тем меньше ширина кольца. До 1960 г. между ними наблюдалась слабая положительная корреляция.

Для сравнения приведем данные содержания CO_2 в кольцах спилов кедров, росших на юге Томской области (см. рис. 6, а) и на Семиринском хребте Горного Алтая (см. рис. 6, б). Содержание CO_2

в годичных кольцах «томского» кедра до начала 1960-х гг. не испытывает значительного тренда, но затем происходит его рост, тогда как кедр с Семиринского хребта сразу накапливает значительное количество CO_2 , которое постепенно, с течением времени снижается. В первом случае увеличение содержания CO_2 мы связали с изменением атмосферных условий: ростом содержания атмосферного CO_2 и изменением в нем отношения изотопов углерода [8]. Во втором случае в горных условиях на общее снижение содержания CO_2 влияет, вероятно, повышенная солнечная радиация и более короткий вегетационный сезон. Следует отметить, что рост содержания CO_2 возле 60-х гг. остается и в погодичном распределении CO_2 по кольцам в спиле кедра с Семиринского хребта (1963 г.), однако в распределении CO_2 появляются дополнительные максимумы долгопериодного цикла (~ 40 лет).

Связь вариаций содержания CO_2 и H_2O с метеорологическими параметрами

Был выполнен анализ связи вариаций содержания CO_2 и H_2O в годичных кольцах кедра из района Томска с метеорологическими параметрами: температурой, количеством осадков и облачностью. Для этого использовались методы вейвлетного анализа, спектрального и кросс-спектрального анализа высокого разрешения, техника цифровой фильтрации временных рядов и стандартный корреляционный анализ. Получены следующие основные результаты, более подробно изложенные в [9].

Содержания CO_2 и H_2O в годичных кольцах кедра испытывают вариации в широком диапазоне временных масштабов – от двух лет до десятилетий. Они подвержены воздействию климатических факторов. Наиболее тесно они связаны с 4- и 2-летними вариациями количества осадков в фазе покоя и с аналогичными вариациями нижней облачности в период вегетации при определяющей роли осадков. Синхронные между собой колебания содержаний CO_2 и H_2O противоположны по фазе 4- и 2-летним колебаниям количества осадков. Наряду с этим 4-летние колебания содержаний CO_2 и H_2O происходят в фазе, а 2-летние колебания – в противофазе с соответствующими вариациями нижней облачности в период вегетации. Рис. 7, на котором представлены 4-летние вейвлет-компоненты количества осадков в период покоя, содержания CO_2 , сигнала от ($CO_2 + H_2O$), демонстрирует противофазность 4-летних колебаний содержаний CO_2 и H_2O , с одной стороны, и количества осадков – с другой, в течение большей части периода совместных измерений.

Предполагается, что весеннее таяние твердых осадков влияет на транспирационный ток дерева через изменение осмотического потенциала, вызванное изменением концентрации и pH почвенного раствора. Вариации количества облаков нижнего яруса модулируют степень освещенности и тем самым тоже влияют на скорость транспирационного

тока. Вариации количества осадков в период покоя и вариации количества облаков нижнего яруса в период вегетации согласованы между собой по фазе. Их воздействия на содержание CO₂ и H₂O в годичных кольцах суммируются на масштабе 4-летних вариаций и противоположены на масштабе 2-летних вариаций. Это приводит к усилению 4-летних и ослаблению 2-летних колебаний содержания CO₂ и H₂O по сравнению с соответствующими колебаниями количества осадков и облачности.

Многолетние вариации содержания CO₂ антикоррелируют с приземной температурой в период вегетации. Каких-либо других закономерностей между многолетними вариациями содержания CO₂ и H₂O в годичных кольцах и вариациями метеопараметров не выявлено. Возможно, причина состоит в асинхронности воздействия различных метеорологических факторов на больших временных масштабах.

Установленные закономерности справедливы для Томского региона, и их не следует распространять на другие регионы.

Заключение

Таким образом, исследования содержания CO₂ в годичных кольцах спилов хвойных деревьев из различных мест обитания показывают, что

1) спилы содержат погодичные распределения содержания CO₂, в которых выделяется 4-летняя цикличность;

2) в распределении CO₂ по кольцам кроме 4-летних циклов отмечается появление долгопериодных вариаций, что, вероятнее всего, связано с возникновением неблагоприятных климатических условий: изменением содержания CO₂ в атмосфере и изотопного состава углерода CO₂, влиянием повышенной солнечной радиации, изменением продолжительности вегетационного сезона и т.д.;

3) тренды содержания CO₂ в кольцах спилов деревьев, произрастающих в различных условиях, имеют разные знаки;

4) содержания CO₂ и H₂O в годичных кольцах сибирского кедра, испытывающие вариации в широком диапазоне временных масштабов, подвержены воздействию климатических факторов. Наиболее тесно они связаны с 4- и 2-летними вариациями количества осадков в фазе покоя и нижней облачности в период вегетации при определяющей роли осадков. Синхронные между собой колебания содержания CO₂ и H₂O противоположны по фазе 4- и 2-летним колебаниям количества осадков. Наряду с этим многолетние вариации содержания CO₂ антикоррелируют с приземной температурой в период вегетации.

Для более полного представления влияния неблагоприятных климатических условий на содержание CO₂ в кольцах необходимо проводить дополнительные исследования. Ответ на этот вопрос, как нам кажется, даст возможность понять влияние роли CO₂ в стволе как регулятора дыхания растений, находящихся в неблагоприятных климатических условиях.

Работа выполняется по проекту VII.66.1.3 Программы фундаментальных исследований СО РАН.

1. Körnen C. Plant CO₂ responses: an issue of definition, time and resource supply // *New Phytologist*. 2006. V. 172. P. 393–411. doi: 10.1111/j.1469–8137.2006.01886.x
2. Savard M.M. Tree-ring stable isotopes and historical perspectives on pollution – an overview // *Environ. Pollut.* 2010. V. 158, N 6. P. 2007–2013.
3. Edwards N.T., Tschaplinski T.J., Norby R.J. Stem respiration increases in CO₂-enriched sweetgum trees // *New Phytologist*. 2002. V. 155, N 2. P. 239–248.
4. Teskey R.O., Saveyn A., Steppe K., McGuire M.A. Origin, fate and significance of CO₂ in tree stems // *New Phytologist*. 2008. V. 177, N 1. P. 17–32.
5. Janouš D., Pokorný R., Brossaud J., Marek M.V. Long-term effects of elevated CO₂ on woody tissues respiration on Norway spruce studied in open-top chambers // *Biologia Plantarum*. 2000. V. 43, N 1. P. 41–46.
6. Ageev B., Ponomarev Yu., Sapozhnikova V. Laser Photoacoustic Detection of CO₂ in Old Disc Tree-Rings // *Sensors*. 2010. V. 10. P. 3305–3312. doi: 10.3390/s100403305.
7. Ageev B.G., Zotikova A.P., Padalko N.L., Ponomarev Yu.N., Savchuk D.A., Sapozhnikova V.A., Chernikov E.V. Variation of H₂O, CO₂, and CO₂ Isotope Composition in Tree Rings of Siberian Stone Pine // *Atmos. Ocean. Opt.* 2011. V. 24, N 4. P. 390–395.
8. Ageev B.G., Ponomarev Yu.N., Sapozhnikova V.A. Laser Photoacoustic Method for Disc Tree-Ring Gas Analysis // *World Environ.* 2012. V. 2, N 2. P. 4–10. doi: 10.5923/j.env.20120202.02.
9. Саножникова В.А., Груздев А.Н., Агеев Б.Г., Пономарев Ю.Н., Савчук Д.А. Связь вариаций содержания CO₂ и H₂O в годичных кольцах кедра сибирского с вариациями метеорологических параметров // Докл. РАН. 2013 (в печати).
10. West G.A., Barret J.J., Siebert D.R., Reddy K.V. Photoacoustic spectroscopy // *Rev. Sci. Instrum.* 1983. V. 54. P. 797–817.
11. Zharov V.P., Letokhokov V.S. Laser Optoacoustic Spectroscopy. M.: Nauka, 1984. 320 p.
12. Meyer P.L., Sigrist M.W. Atmospheric pollution monitoring using CO₂ laser photoacoustic spectroscopy and other techniques // *Rev. Sci. Instrum.* 1990. V. 61, N 7. P. 1779–1807.
13. *Air Monitoring by Spectroscopic Techniques* / Ed. M.W. Sigrist. N.Y.: John Wiley and Sons, Inc., 1994. 532 p.
14. Harren F.J.M., Cotti G., Oomens J., Hekkert S. te L. Photoacoustic Spectroscopy in Trace Gas Monitoring in *Encyclopedia of Analytical Chemistry* / Ed. R.A. Meyers. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2000. P. 2203–2226.
15. Rey J.M., Schramm D., Hahnloser D., Marinov D., Sigrist M.W. Spectroscopic investigation of volatile compounds produced during thermal and radiofrequency bipolar cautery on porcine liver // *Meas. Sci. Technol.* 2008. V. 19, N 7. 5 p.
16. Рублев А.Н., Григорьев Г.Ю., Удалова Т.А., Журавлева Т.Б. Регрессивные модели для оценки углеродного обмена в бореальных лесах // *Оптика атмосф. и океана*. 2010. Т. 23, № 1. С. 21–26.
17. Sherstov I.V., Bychkov K.V., Vasil'ev V.A., Karapuzikov A.I., Spitsyn V.V., Chernikov S.B. Two-channel CO₂ laser system for heterodyne lidar // *Atmos. Ocean. Opt.* 2005. V. 18, N 3. P. 248–253.

18. Rothman L.S., Gordon I.E., Barbe A., Benner C.D., Bernath P.F., Birk M., Boudon V., Brown L.R., Campargue A., Champion J.P., Chance K., Coudert L.H., Dana V., Devi V.M., Fally S., Flaud J.-M., Gamache R.R., Goldman A., Jacquemart D., Kleiner I., Lacome N., Lafferty W.J., Mandin J.-Y., Massie S.T., Mikhailenko S.N., Miller C.E., Moazzen-Ahmadi N., Naumenko O.V., Nikitin A.V., Orphal J., Perevalov V.I., Perrin A., Predoi-Cross A., Rinsland C.P., Rotger M., Šimečkova M., Smith M.A.H., Sung K., Tashkun S.A., Tennyson J., Toth R.A., Vandaele A.C., Vander Auwera J. The HITRAN 2008 molecular spectroscopic database // J. Quant. Spectrosc. and Radiat. Transfer. 2009. V. 110, N 9–10. P. 533–572.

B.G. Ageev, A.N. Gruzdev, G.V. Matyashenko, D.A. Savchuk, V.A. Sapozhnikova, Yu.N. Ponomarev.

Variations and trends of CO₂ and H₂O content in coniferous tree ring discs.

The experimental measurements of CO₂ and H₂O in disc tree-rings of some coniferous from regions with different climates have been obtained, the results were compared with the tree-ring widths, some conclusions were made about climatic response of annual CO₂ and H₂O distributions. The hypothesis was put forward that the appearance of long-period cyclicities in annual CO₂ tree-ring distribution is a tree's response to the environmental change.