

РАДИАЦИЯ И БИОСФЕРА

УДК 581.5+581.134.5:581.824+582.475+551.510.534

Хронологии газовых составляющих в древесных кольцах спилов лиственных деревьев

Б.Г. Агеев¹, В.А. Сапожникова^{✉1}, А.Н. Груздев², Д.А. Савчук^{3*}

¹Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

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

³Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН
634055, г. Томск, пр. Академический, 10/3

Поступила в редакцию 12.04.2023 г.;
после доработки 5.05.2023 г.;
принята к печати 25.05.2023 г.

Проведены измерения газов, десорбированных вакуумным методом из колец спилов лиственных деревьев, с использованием оптико-акустического газоанализатора с перестраиваемым CO₂-лазером. Получены хронологии остаточных газов CO₂ и (CO₂ + H₂O) некоторых лиственных деревьев, произрастающих в районе г. Томска (Западная Сибирь). Хронологии характеризуются хорошо выраженными 2–4-летними циклами. Найдена корреляция содержания газов с летними температурами и осадками. Полагаем, что погодичное распределение остаточных газов в спилах отражает картину поступления газов из стволов лиственных деревьев в атмосферу.

Ключевые слова: CO₂, цикличность, годовые кольца, лиственные деревья; CO₂, cyclicity, tree ring, deciduous tree.

Введение

Леса России составляют 22% мировых лесных ресурсов и около 2/3 бореальных лесов мира [1]. Они являются крупнейшим резервуаром углерода, поглощаемого из атмосферы. К примеру, бореальные леса Евразии в широтном поясе 50–70° хранят 25% всего земного углерода [2]. В углеродном балансе лесов большую роль играет диффузия углекислого газа из стволов деревьев. Диффузия CO₂ из ствола является показателем дыхания клеток ствола и корней. Было найдено [3], что стволы деревьев бореальных и тропических лесов могут выделять в атмосферу 11–23 и 40–57% ассимилированного углерода соответственно. Годовой вклад потока CO₂ от стволов в дыхание экосистем был оценен как ≤15% в бореальных лесах и ~27% в тропических [3]. По данным [4], от 30 до 70% ассимилированного углерода теряется при дыхании стволами взрослых деревьев ежегодно. По некоторым оценкам, выделение CO₂ тканями древесины составляет 5–35% дыхания экосистем. Такой разброс оценок объяснялся, в частности, невозможностью

точно измерить дыхательный поток отдельного дерева [5].

Диффузионный поток CO₂ зависит от разности концентраций CO₂ в дереве и атмосфере. Поэтому определенное представление о его динамике можно получить, изучая ту часть CO₂, которая сохраняется в стволах деревьев. Ранее предложенная нами методика (например, [6]) дала возможность выявить и изучить особенности распределения CO₂ (и H₂O) в годовых кольцах древесины хвойных деревьев. Было обнаружено, что распределение CO₂ в годовых кольцах и, следовательно, временная динамика накопленного в древесине CO₂ характеризуется определенной цикличностью. Так, в распределениях остаточных CO₂ и H₂O в годовых кольцах кедров сибирского обнаружены 2-летний и 4-летний циклы [6], а у поврежденных пожаром деревьев зафиксирована смена 4-летнего цикла на 3-летний [7].

Считается, что меняющиеся климатические условия могут изменить роль лесов как потенциальных поглотителей углерода [8]. Кроме того с изменением климата прогнозируется смещение границы лесов. Например, еще в 1985 г. высказывалось предположение, что граница леса в Канаде будет сдвигаться на 100 км на север на каждый градус потепления [9]. По прогнозам, к 2100 г. хвойные леса исчезнут почти на всей территории Европы, а на юге

* Борис Григорьевич Агеев (ageev@iao.ru); Валерия Александровна Сапожникова (sapo@iao.ru); Александр Николаевич Груздев (a.n.gruzdev@mail.ru); Дмитрий Анатольевич Савчук (savchuk@imces.ru).

Западной Сибири хвойные сменяются такими широколиственными видами, как дуб, клен, липа и др. [9].

Способность поглощать CO_2 у разных видов деревьев различна. Если у ели ее принять за 100%, то эффективность поглощения лиственницы составит 118%, сосны обыкновенной — 164%, липы — 254%, дуба черешчатого — 450%, тополя берлинского — 691% [1]. К особенностям лиственных видов, по сравнению с хвойными, относится их способность удерживать больше воды благодаря более высокому содержанию гемицеллюлозы [10].

Прогнозируемая смена хвойных лесов лиственными ставит вопрос об особенностях выделения CO_2 стволами лиственных деревьев. Ранее нами были проведены обширные измерения содержания остаточных газов в спилах хвойных деревьев, в результате которых получены соответствующие хронологии [11], проведен их статистический анализ, показана связь с метеопараметрами. Полученные результаты изложены в ряде работ (см., например, [6, 7, 12]). Мы предполагаем, что погодичное распределение в древесных кольцах сохранившейся доли выдыхаемого растением CO_2 может отражать картину поступления CO_2 из стволов в атмосферу.

Цель настоящей работы — анализ распределения остаточных газовых компонентов (CO_2 , $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$) в древесине годичных колец широко распространенных в лесах умеренного пояса России лиственных деревьев: березы повислой (*Betula pendula* Roth.), осины (*Populus tremula* L.), черемухи обыкновенной (*Prunus padus* L.), ивы белой (*Salix alba* L.) и липы сердцевидной (*Tilia cordata* Mill.).

Материалы и методы

Материалом для исследований послужили спилы стволов деревьев, росших на юго-востоке Западной Сибири в районе г. Томска (56,5° с.ш., 85° в.д.). Спилы ивы, березы и липы брали в черте города, черемухи — в пригороде (Академгородок), осины,

осины М, березы М — в лесном массиве (41 км от Томска). Основные характеристики исследуемых спилов приведены в табл. 1.

Газовые компоненты CO_2 ($\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$) были десорбированы под вакуумом из древесины каждого годичного кольца спила. Содержание газов оценивалось с помощью оптико-акустического лазерного газоанализатора (см., например, [12]). Выходные сигналы газоанализатора («сигнал») на линиях генерации CO_2 -лазера пропорциональны концентрациям исследуемых CO_2 и ($\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$) с точностью до калибровочного множителя.

Ширина годичных колец (радиальный прирост) на спилах измерялась на полуавтоматическом измерительном комплексе LINTAB с точностью 0,01 мм.

Наряду с результатами измерений указанных характеристик годичных колец в работе использованы данные измерений приземной температуры воздуха и суммы осадков на государственной метеостанции Томска (синоптический индекс ВМО 29430).

Для анализа периодичностей содержания газовых компонентов и метеопараметров использован спектральный метод максимальной энтропии [13].

Результаты и обсуждение

Результаты измерений

На рис. 1 представлены результаты измерений сигналов поглощения CO_2 и ($\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$) в древесине годичных колец и ширины годичных колец ивы в зависимости от датировки годичных колец. Для всех параметров характерны межгодовые вариации. Они более заметны в хронологиях ($\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$) на линии генерации (10R20) (длина волны 976,18 см⁻¹), где сигналы приблизительно в три раза выше сигналов от CO_2 . Отметим, что за резким падением сигнала от ($\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$) в 2015 г. последовало увеличение сигналов как CO_2 , так и ($\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$).

На рис. 2–5 представлены результаты аналогичных измерений для березы, черемухи, осины

Таблица 1

Основные характеристики спилов стволов лиственных деревьев

Вид дерева	Диаметр, мм	Толщина, мм	Время отбора	Время измерений	Количество колец	Место произрастания
Осина	130	86	октябрь 2021 г.	март 2022 г.	39	лесной массив, 41 км от города
Осина М	70	40	октябрь 2021 г.	март 2022 г.	8	лесной массив, 41 км от города
Береза М	75	80	октябрь 2021 г.	март 2022 г.	13	лесной массив, 41 км от города
Черемуха	150	35	ноябрь 2021 г.	март 2022 г.	27	лесопарк в пригороде
Береза	150	100	декабрь 2021 г.	октябрь 2022 г.	40	в черте города
Ива	150	90	июнь 2022 г.	октябрь 2022 г.	23	в черте города
Липа	120	90	октябрь 2022 г.	февраль 2023 г.	28	в черте города

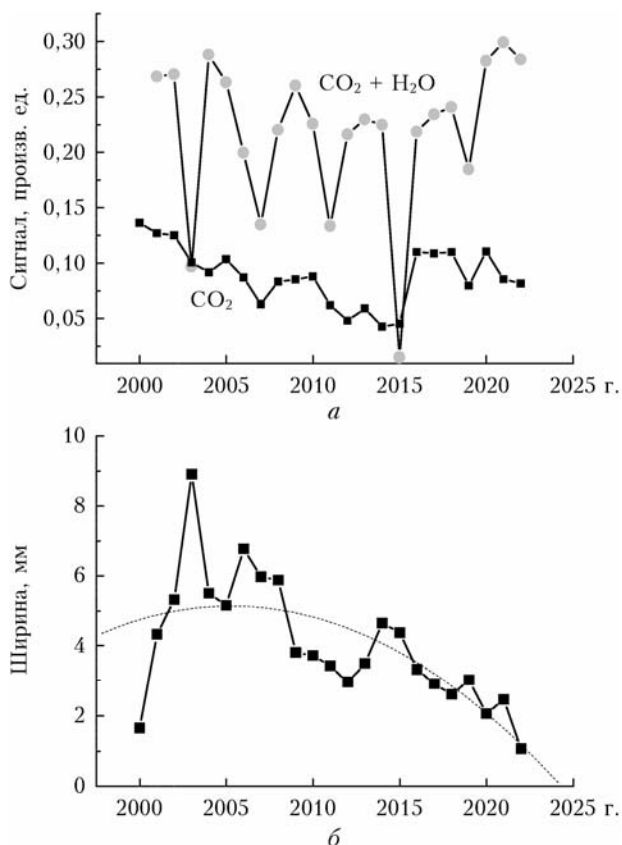


Рис. 1. Сигналы поглощения газами (а) и вариации ширины годичных колец (б) ивы

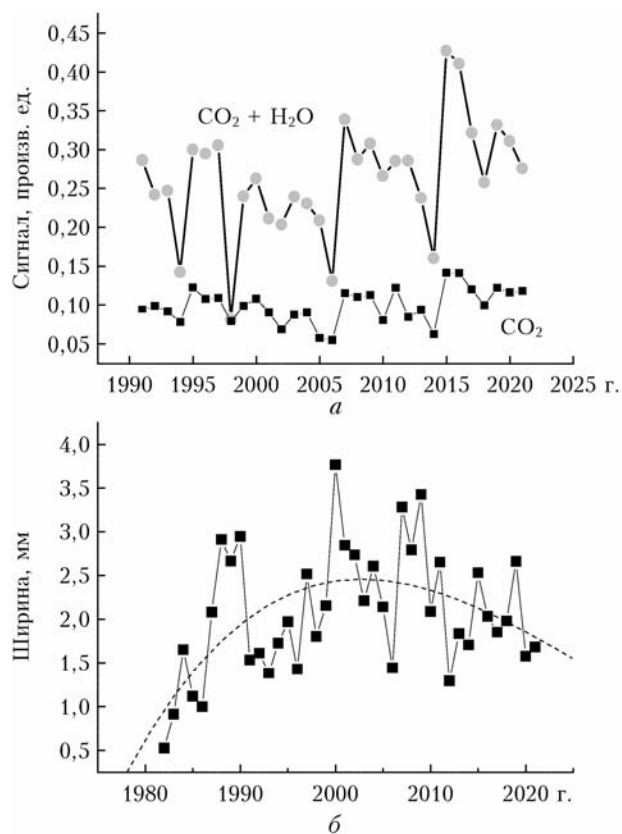


Рис. 2. То же, что на рис. 1, для березы

и липы. Начиная с 2005 г. в спиле березы (рис. 2) наблюдалось увеличение сигнала от CO_2 (и $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$) (рис. 2, а) и уменьшение ширины кольца (рис. 2, б). Сигнал от ($\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$) для березы, как и для ивы, приблизительно в три раза выше средних значений для CO_2 .

Подобно иве, в годичных кольцах черемухи отмечено резкое уменьшение концентрации остаточных газов в 2014–2015 гг., а ширина колец уменьшается примерно с 2005 г. (рис. 3). Как и в предыдущих случаях, сигнал от ($\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$) выше сигнала от CO_2 .

Похожие особенности характерны для осины: уменьшение сигналов от CO_2 и ($\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$) в 2014 г. и замедление прироста дерева после 2004–2005 гг. (рис. 4).

Временная динамика содержания газов в годичных кольцах липы имеет отличительные особенности. В период 2003–2007 гг. отмечены минимальные концентрации газов, в течение следующего года концентрации резко возросли (рис. 5, а). В значениях ширины годичных колец липы отмечен минимум в 2015 г. (рис. 5, б).

Из представленных рисунков отчетливо видно, что у всех спилы для большинства лет «сигнал» от смеси ($\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$) существенно, до трех раз, сильнее, чем от CO_2 . Такого не наблюдалось для спилы хвойных деревьев, где это превышение было намного меньше. Видимо, это отражает известный факт,

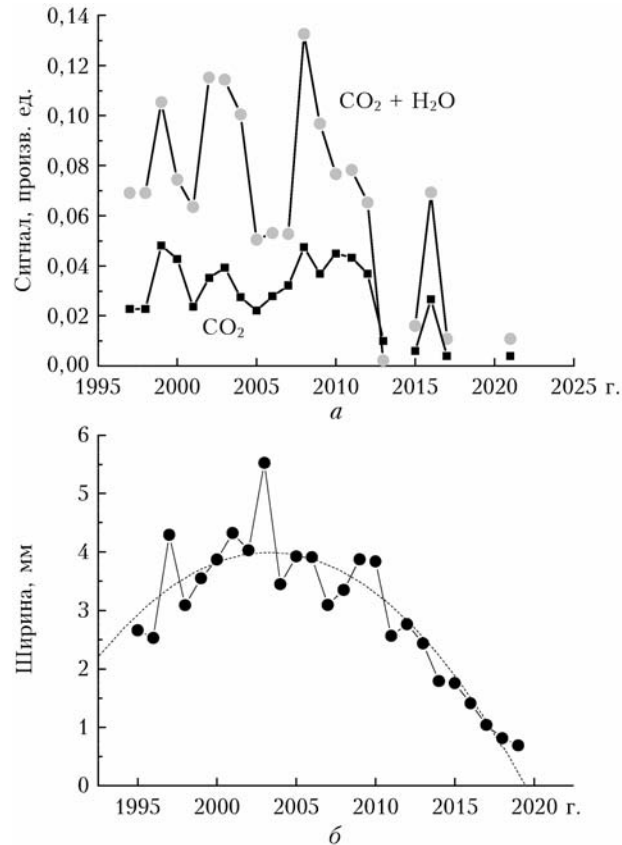


Рис. 3. То же, что на рис. 1, для черемухи

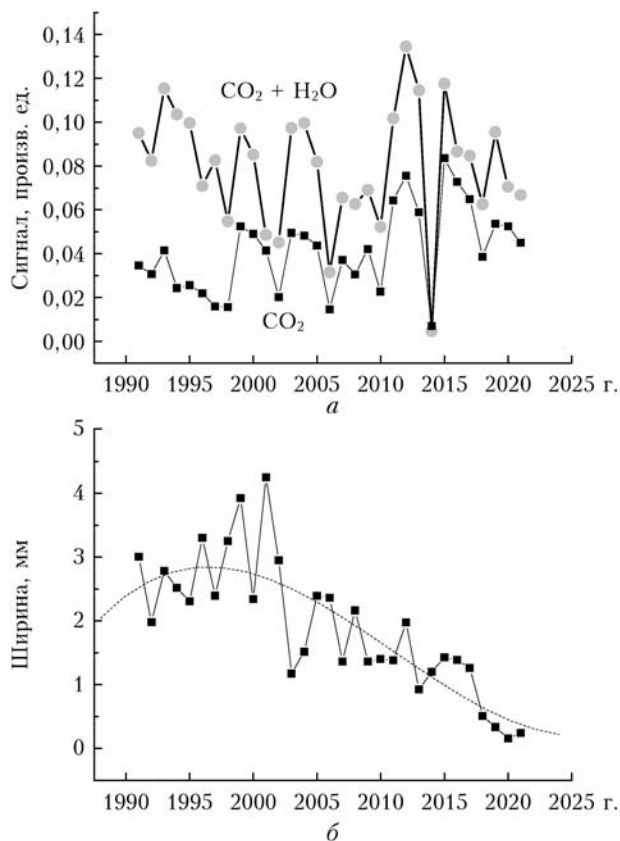


Рис. 4. То же, что на рис. 1, для осины

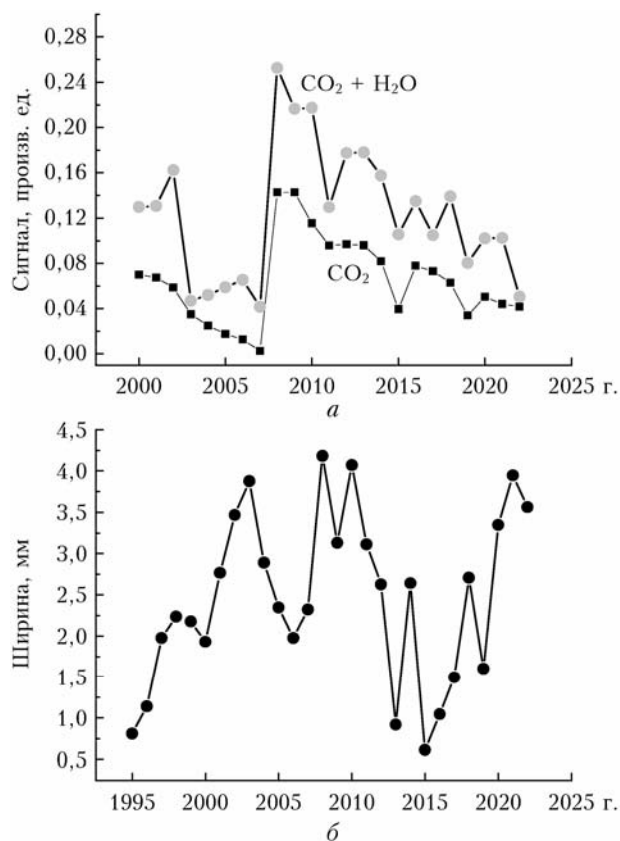


Рис. 5. То же, что на рис. 1, для липы

что все хвойные породы отличаются высоким содержанием смол в теле древесины. Благодаря такой пропитке волокна хвойных деревьев слабо впитывают воду.

Сравнение хронологий

На рис. 6 представлены хронологии содержания CO_2 в спилах деревьев одного вида.

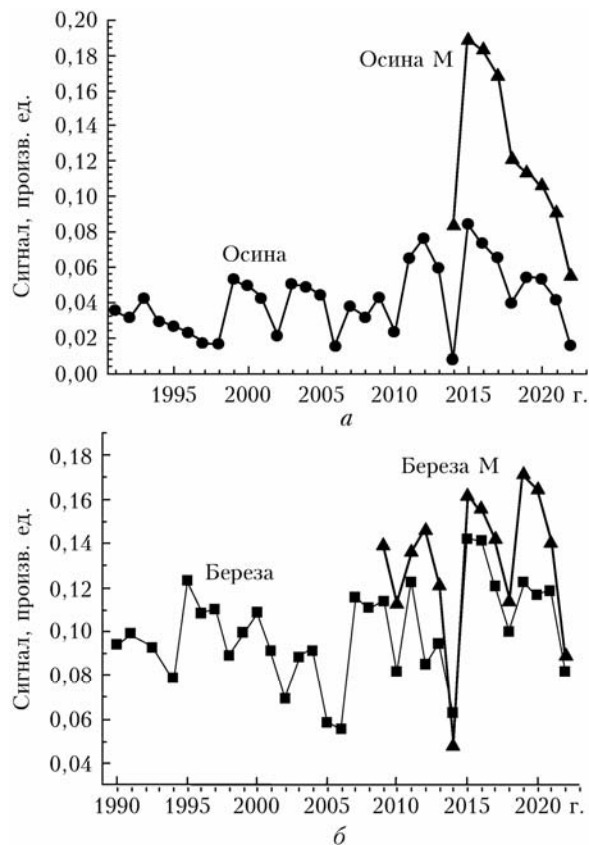


Рис. 6. Хронологии содержания CO_2 в двух спилах осины (а) и двух спилах березы (б)

Коэффициенты корреляции между хронологиями высокие: $R = 0,90$, $P = 8,6\text{E-}4$ (осина – осина М), $R = 0,8$, $P = 2,9\text{E-}4$ (береза – береза М). Спилов одного места произрастания (осина и осина М) имеют существенное различие в величине сигнала от CO_2 (содержание CO_2), по сравнению со спилами, взятыми из разных мест (береза и береза М). Видимо, сказываются разные условия произрастания деревьев.

Спектральный анализ вариаций

Результаты спектрального анализа рядов CO_2 и $(\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O})$ для ивы, березы, черемухи, осины и липы приведены на рис. 7 (из данных предварительно были исключены квадратичные тренды). Спектры для ивы, березы, черемухи и осины указывают на наличие колебаний с периодом около четырех лет в содержании газов (рис. 7, а–г). Спектральные максимумы CO_2 и $(\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O})$ для

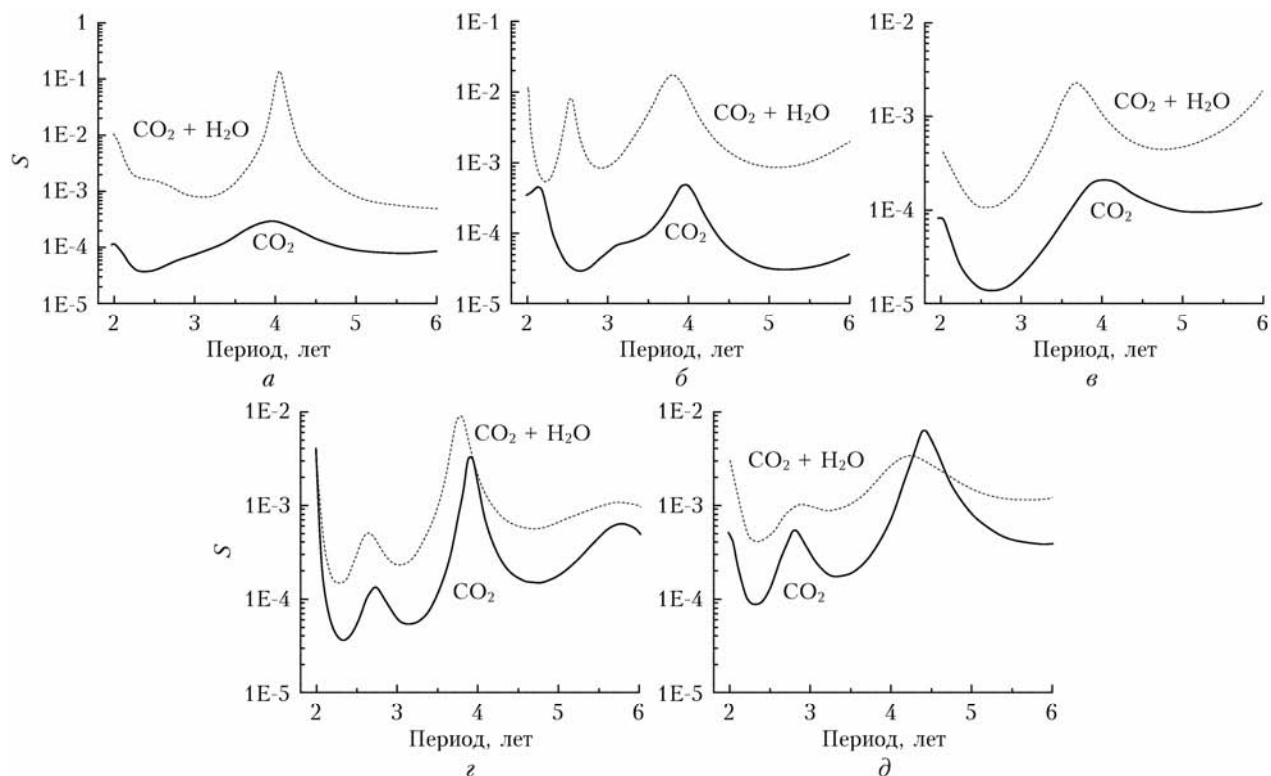


Рис. 7. Результат спектрального анализа хронологий CO_2 и $(\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O})$ для ивы (*а*), березы (*б*), черемухи (*в*), осины (*г*) и липы (*д*) (здесь и далее S — спектральная плотность)

липы смещены в сторону больших значений и примерно соответствуют периоду колебаний 4,5 года. Однако если исключить из данных для липы интервал, предшествующий 2008 г., нарушающий регулярность колебаний концентрации газов (см. рис. 5, *а*), то спектральные максимумы CO_2 и $(\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O})$ будут соответствовать 4-летнему периоду. Таким образом, в концентрациях остаточных газов во всех деревьях присутствуют колебания с периодом ~ 4 лет.

Рис. 7 указывает на наличие 2-летней компоненты в вариациях концентраций газов. Согласно рис. 7, 4-летние вариации доминируют в межгодовой изменчивости CO_2 и $(\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O})$. Отметим близость этой величины цикла концентраций газов к периодичностям плодоношения древесных пород [14].

Возникает вопрос о природе 4-летних колебаний CO_2 и $(\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O})$ в годичных кольцах деревьев. В работе [6] показано, что такие колебания в годичных кольцах спила кедра сибирского из района Томска статистически связаны с 4-летними вариациями средней за периоды вегетации (май — сентябрь) температуры и суммами осадков за период покоя (октябрь — апрель). Там же предложены возможные объяснения этой связи.

Корреляция содержания остаточных газов с летними температурами и осадками

На рис. 8 приведены спектры приземной температуры воздуха и сумм осадков по данным томской метеостанции для летних (июнь — август) и вегетационных (май — сентябрь) периодов в интервале

~ 1990 – 2022 гг., который соответствует интервалу данных для годичных колец на рис. 1–5. Видно несовпадение спектров летнего и вегетационного периодов. В спектрах вегетационного периода четко фиксируется период, близкий к 4 годам. В спектрах летнего периода наблюдается сдвиг в сторону 4,5–5 лет. Следовательно, 4-летние колебания CO_2 и $(\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O})$ в годичных кольцах рассматриваемых лиственных деревьев могут быть сильнее всего связаны с межгодовыми вариациями температуры и осадков, характеризующими вегетационный период года.

Динамика циклов температур и осадков для г. Томска хорошо прослеживается в результатах спектрально-временного анализа. На рис. 9 приведены скользящие спектры сумм летних (июнь, июль, август) осадков и сумм летних температур. В них выделяются продолжительные интервалы с 2- и 4-летними годовыми вариациями этих метеопараметров. Четырехлетний период характерен и для большинства спектров на рис. 7.

Спектры рассчитаны по скользящему интервалу 20 лет (порядок авторегрессии 7). Дата на горизонтальной оси соответствует середине 20-летнего интервала. Заметны длительные периоды существования 2- и 4-летних циклов в рядах температуры и осадков для г. Томска.

Для всех хронологий выполнялся корреляционный анализ содержания остаточных газов со среднемесячными температурами и суммами осадков данного региона, его результаты приведены в табл. 2. Все расчеты проводились до глубины сдвига (Δ) 5 лет. Сдвиг определялся из предположения, что активное выделение CO_2 (или $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$) может

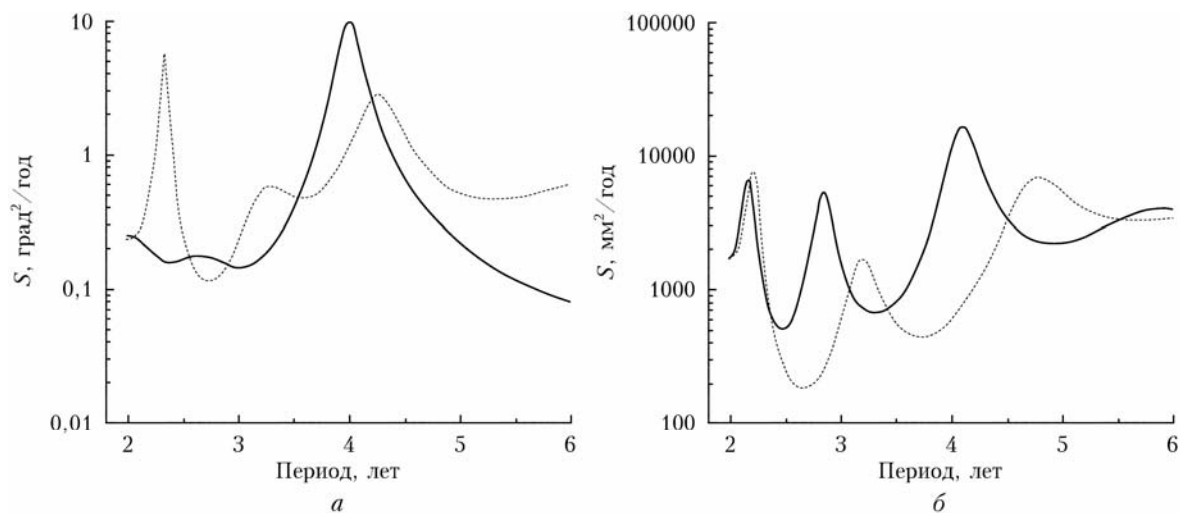


Рис. 8. Спектры средней температуры (а) и суммы осадков (б) для летнего (июнь – август, пунктирные кривые) и вегетационного (май – сентябрь, сплошные кривые) периодов 1990–2022 гг. (г. Томск)

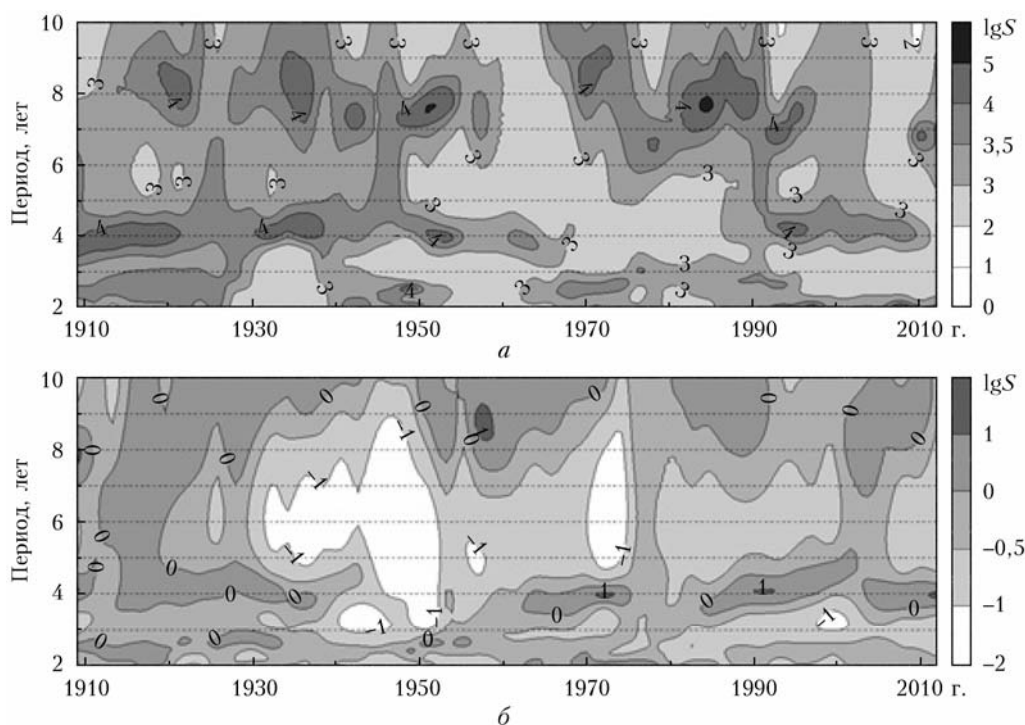


Рис. 9. Скользящие спектры сумм летних осадков (а) и сумм летних температур (б) для Томска

происходить не в кольце текущего года, но и в более ранние сроки, поэтому исследуемые хронологии последовательно смещались во времени на n лет.

Следует отметить, что хронологии ($\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$) значимо связаны с шириной колец большинства видов лиственных деревьев, кроме березы. Напротив, хронологии CO_2 менее связаны с шириной колец лиственных деревьев, за исключением черемухи и березы. Причем в основном связь этих остаточных газов наблюдается с шириной кольца текущего года ($\Delta 0$). Сдвиг связи на несколько лет по отношению к текущему году – явление, характерное не только для лиственных, но и для хвойных [15] де-

ревьев. Это свидетельствует о том, что активный транспорт CO_2 идет не по кольцу текущего года, а по предыдущим кольцам.

Отличия в величине и знаке значимых коэффициентов корреляции остаточных газов с температурой и осадками вегетационного сезона и шириной колец (табл. 2) объясняются разными сроками сокодвижения, распускания почек, появления листьев, цветения, плодоношения у различных видов лиственных деревьев. Физиологические процессы в дереве на всех этапах его роста и развития сильно зависят от сухости воздуха, влажности и плодородия почв, освещенности, загрязнения воздуха и почв и т.д.

Таблица 2

Значимая корреляция содержания остаточных газов с климатическими параметрами и шириной колец древесины лиственных деревьев (Δ – сдвиг на n лет; N – длина ряда)

Вид дерева	Среднемесячная температура			Сумма осадков			Ширина колец
	Май	Июнь	Июль	Май	Июнь	Июль	
Коэффициенты корреляции с CO ₂							
Ива	R = 0,61; N = 22; P = 0,003; Δ1	—	R = -0,40; N = 23; P = 0,05; Δ0	—	—	R = -0,40; N = 23; P = 0,04; Δ3	—
Береза	R = -0,51; N = 27; P = 0,007; Δ2	—	—	R = 0,56; N = 26; P = 0,003; Δ2	R = -0,38; N = 31; P = 0,03; Δ3	—	R = -0,41; N = 31; P = 0,02; Δ3
Черемуха	—	R = -0,43; N = 21; P = 0,05; Δ1	—	—	R = 0,55; N = 21; P = 0,01; Δ1	—	R = 0,50; N = 20; P = 0,02; Δ0
Осина	—	R = 0,40; N = 31; P = 0,03; Δ0	R = -0,37; N = 31; P = 0,04; Δ2	R = 0,52; N = 31; P = 0,003; Δ2	—	—	—
Липа	R = -0,44; N = 23; P = 0,04; Δ3	—	—	—	—	—	—
Коэффициенты корреляции с (CO ₂ + H ₂ O)							
Ива	—	—	—	—	R = 0,43; N = 23; P = 0,04; Δ2	—	R = -0,50; N = 23; P = 0,03; Δ0
Береза	—	R = 0,40; N = 35; P = 0,03; Δ0	—	R = 0,48; N = 32; P = 0,005; Δ2	—	—	—
Черемуха	—	—	—	—	R = 0,70; N = 21; P = 3,1E-4; Δ1	—	R = 0,60; N = 20; P = 0,007; Δ0
Осина	—	R = -0,40; N = 31; P = 0,04; Δ2	R = -0,43; N = 31; P = 0,02; Δ2	—	—	—	R = 0,68; N = 31; P < 0,0001; Δ0
Липа	R = -0,43; N = 23; P = 0,04; Δ2	—	—	—	—	—	R = -0,40; N = 23; P = 0,05; Δ0

Заключение

В работе впервые представлены результаты исследования хронологий остаточных газов CO₂ и (CO₂ + H₂O) в древесине годичных колец лиственных деревьев: ивы, березы, черемухи, осины и липы, произрастающих в районе г. Томска. Результаты показали следующее:

– сорбированные древесиной в процессе жизнедеятельности газы (CO₂, CO₂ + H₂O) имеют по-годовое распределение, отражающее характер выделения CO₂ стволами;

– общая особенность распределений CO₂ и (CO₂ + H₂O) во всех деревьях – наличие периодических вариаций, которые соответствуют временным колебаниям с периодом 4 года;

– 4-летние вариации выявлены также в приземной температуре воздуха и сумме осадков в периоды вегетации растений (май – сентябрь);

– хронологии CO₂ и (CO₂ + H₂O) в основном коррелируют с температурами и осадками летних месяцев района произрастания;

– в отличие от хвойных деревьев, хронологии CO₂, (CO₂ + H₂O) лиственных деревьев имеют слабую корреляцию с шириной колец.

Результаты работы могут быть использованы при оценках баланса углерода в лиственных лесах и представляют интерес для специалистов, занимающихся проблемами биосферно-атмосферного обмена в условиях меняющегося климата и вытеснения хвойных лесов лиственными.

Финансирование. Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (госзадание ИОА СО РАН, регистрационный номер проекта FWRU-2021-0009, 121031500340-6, ИМКЭС СО РАН, регистрационный номер проекта FWRG-2021-0003, 121031300226-5).

Список литературы

1. Чураков Б.П., Чураков Д.Б. Лесоведение. Ульяновск: УлГУ, 2018. 259 с.
2. Black T.A., Gaumont-Guay D., Jassal R.S., Amiro B.D., Jarvis P.G., Gower S.T., Kelliher F.M., Dunn A., Wofsy S.C. Measurement of CO₂ exchange between boreal forest and the atmosphere // SEB Exp Biol Ser. 2005. 151-85. PMID: 17633035.
3. Yang J., He Y., Aubrey D.P., Zhuang Q., Teskey R.O. Global patterns and predictors of stem CO₂ efflux in forest ecosystems // Global Change Biol. 2016. V. 22, N 4. P. 1433–1444. DOI: 10.1111/gcb.13188.
4. Rakonczay Z. Characterizing the Respiration of Stems and Roots of Three Hardwood Tree Species in the Great Smoky Mountains: Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in Forestry. Blacksburg: Virginia Polytechnic Institute, 1997. 161 p. URL: <https://vtechworks.lib.vt.edu/bitstream/handle/10919/30624/etd.PDF?sequence=1&isAllowed=y> (last access: 9.03.2023).
5. De Roo L., Bloemen J., Dupon Y., Salomyn R.L., Stepe K. Axial diffusion of respired CO₂ confounds stem respiration estimates during the dormant season // Ann. Forest Sci. 2019. V. 76, N 52. P. 1–11. DOI: 10.1007/s13595-019-0839-6.
6. Сапожникова В.А., Груздев А.Н., Агеев Б.Г., Пономарев Ю.Н., Савчук Д.А. Связь вариаций CO₂ и H₂O в годичных кольцах кедра сибирского с вариациями метеорологических параметров // Докл. РАН. 2013. Т. 450, № 5. С. 1–7.
7. Агеев Б.Г., Сапожникова В.А., Груздев А.Н., Савчук Д.А. Вариации радиального прироста и газовых компонентов древесины лиственниц, пораженных пожаром 1908 г. // Оптика атмосфер. и океана. 2022. Т. 35, № 9. С. 782–788; Ageev B.G., Sapozhnikova V.A., Gruzdev A.N., Savchuk D.A. Variations in ring width and gas components in wood of larch trees injured by the fire of 1908 // Atmos. Ocean. Opt. 2022. V. 35, N 9. P. S174–S180. DOI: 10.1134/S1024856023010013.
8. Shan S., Shan C. Tree rings for the assessment of the potential impact of climate change on forest growth // Appl. Ecol. Environ. Res. 2015. V. 13, N 1. P. 277–288. DOI: 10.15666/aeer/1301_277288.
9. Замолодчиков Д., Краев Г. Влияние изменений климата на леса России: зафиксированные воздействия и прогнозные оценки // Устойчивое лесопользование. 2016. Т. 48, № 4. С. 23–31.
10. Колосовская Е.А., Лоскутов С.Р., Чудинов Б.С. Физические основы взаимодействия древесины с водой. Новосибирск: Наука, Сиб. отд-е, 1989. 216 с.
11. Агеев Б.Г., Сапожникова В.А. Годичные ряды концентраций углекислого газа и водяного пара, полученные при оптико-акустическом анализе газовых проб из древесины годичных колец спилов хвойных // Программы для ЭВМ, базы данных, топологии интегральных микросхем. Бюллетень. 2012. № 4: Базы данных, зарегистрированные в реестре баз данных Российской Федерации. С. 731.
12. Агеев Б.Г., Зотикова А.П., Падалко Н.Л., Пономарев Ю.Н., Савчук Д.А., Сапожникова В.А., Черников Е.В. Вариации содержания воды, CO₂ и изотопного состава углерода CO₂ в годичных кольцах кедра сибирского // Оптика атмосфер. и океана. 2011. Т. 24, № 2. С. 149–154; 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.
13. Kay S.M., Marple S.M. Spectrum analysis — a modern perspective // Proc. IEEE. 1981. V. 69, N 11. P. 1380–1419.
14. Справочник лесничего / под ред. В.Д. Новосельцева. М.: Агропромиздат, 1986. 352 с.
15. Зуев В.В., Савчук Д.А., Агеев Б.Г., Бондаренко С.Л., Сапожникова В.А. Новый дендрохронологический параметр как результат оптико-акустических измерений концентрации CO₂ в годичных кольцах деревьев // Оптика атмосфер. и океана. 2006. Т. 19, № 5. С. 465–468.

B.G. Ageev, V.A. Sapozhnikova, A.N. Gruzdev, D.A. Savchuk. Chronologies of gas components in deciduous tree rings.

Gases desorbed by the vacuum method from the tree rings of discs of deciduous trees are measured. The content of residual gases vacuum-desorbed from tree rings is analyzed with an opto-acoustic gas analyzer with a tunable CO₂ laser. The chronologies of residual CO₂ and (CO₂ + H₂O) of some deciduous trees growing near the city of Tomsk (West Siberia) have been derived. All the chronologies are cyclic with pronounced 2–4-year cycles. A correlation was found between the content of gases and summer temperatures and precipitation. We believe that the annual distribution of residual gases in the discs reflects the pattern of annual release of the gases from the stems of the deciduous trees into the atmosphere.