

Тренд концентрации CO_2 в кольцах спилов деревьев и атмосферный CO_2

Б.Г. Агеев, Ю.Н. Пономарев, В.А. Сапожникова*

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

Поступила в редакцию 12.09.2008 г.

Выдвигаются несколько предположений относительно интерпретации результатов исследования содержания CO_2 в кольцах старых спилов деревьев. В частности, предполагается, что найденный тренд погодичного содержания CO_2 в кольцах спилов связан с ростом концентрации атмосферного CO_2 .

Ключевые слова: CO_2 , годовые кольца, лазерный фотоакустический газоанализ.

Введение

Известно, что в стволе живого дерева содержится большое количество газа, однако полного объяснения необходимости его присутствия до сих пор не существует [1]. Основным газом, связанным с протеканием метаболических процессов в дереве, является углекислый газ, образование которого и его роль в этих процессах исследовались во многих работах [2–5]. Парциальное давление CO_2 в кольцах ствола живого дерева может достигать значений 3000–9200 Па [6], а его концентрация может превышать концентрацию атмосферного CO_2 в 30–750 раз, что указывает, как полагают, на существование барьера для диффузии газа из ствола дерева в атмосферу [7].

Вопросам диффузии CO_2 из ствола в атмосферу, оценкам скорости дыхания ствола живого дерева, расчету баланса CO_2 в стволе посвящено большое количество исследований [7], но в этих исследованиях рост атмосферного CO_2 никогда не учитывался: считают, что из-за высокой концентрации CO_2 в стволе живого дерева даже удвоение атмосферного CO_2 практически не изменит величину концентрационного градиента между атмосферным и стволовым CO_2 , поэтому значительного влияния на диффузный процесс не окажет.

Однако ежегодное изменение концентрационного градиента существует (и будет существовать в будущем), и динамика этого процесса, как нам кажется, должна найти отражение в распределении содержания CO_2 в годовых кольцах ствола. Мы предположили, что кольца старых спилов деревьев,

в которых сохранилось большое количество CO_2 [8], могут содержать эту информацию, так как газы, принимающие участие в метаболизме живого дерева в текущем году, могут сорбироваться стенками пористо-капиллярной системы древесины кольца и сохраняться долгое время в стволах деревьев. Если извлечь эти газы, то только CO_2 может иметь картину погодичного тренда из-за влияния, хоть и незначительного, изменения концентрационного градиента между CO_2 в стволе и постоянно растущим атмосферным CO_2 .

В данной статье приведены результаты измерений концентрации CO_2 , извлекаемого вакуумным способом из годовых колец, методом лазерного фотоакустического газоанализа и сделана попытка нахождения связи результатов измерений с изменением атмосферного CO_2 .

Материалы и методы

Нами были проведены измерения относительного содержания CO_2 в пробах газа, извлеченных вакуумным способом из годовых колец спилов десяти пихт (обозначенных Нр 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20) и трех спилов одного дерева кедра. Спилов достаточно долго хранились в лабораторном помещении: спилов кедра были взяты в 1998 г. на склоне Семинского хребта (высота 1689 м, Республика Алтай), а измерения содержания CO_2 проводились в мае–сентябре 2004 г. Образцы спилов пихт были взяты под Томском осенью 2004 г., измерения погодичного содержания CO_2 проводились в течение 2004–2005 гг. Спилов кедра брались на высоте 18 м (спил «а», 49 колец), ~10 м (спил «б», 120 колец) и 0,5 м (спил «с», 186 колец) от поверхности земли, спилов пихт – на высоте 0,7–0,8 м от поверхности земли, возраст деревьев варьировался от 65 до

* Борис Григорьевич Агеев; Юрий Николаевич Пономарев (yurpon@iao.ru); Валерия Александровна Сапожникова (sapo@asd.iao.ru).

81 года. В каждом из спилов исследовалась 25-летняя серия (или чуть больше). Содержание CO_2 в пробах, извлеченных вакуумным методом из колец, измерялось с помощью лазерного фотоакустического газоанализатора [8] (рис. 1).

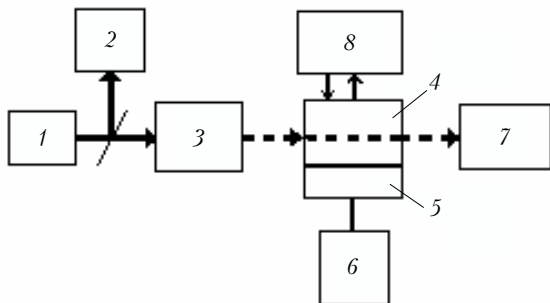


Рис. 1. Схема установки фотоакустического лазерного газоанализатора: 1 – CO_2 -лазер (10,6 мкм); 2 – система контроля временных и спектральных параметров лазера; 3 – формирующая оптика и модулятор; 4, 5 – фотоакустический детектор (4 – фотоакустическая ячейка; 5 – микрофон); 6 – система измерения и регистрации электрических сигналов; 7 – система контроля энергетических параметров излучения лазера; 8 – система для создания вакуума и приготовления проб для анализа

Чувствительность фотоакустического газоанализатора значительно возрастает при резонансном поглощении и большой мощности лазера, поэтому использование CO_2 -лазера для измерения концентрации CO_2 , выделяемого биообъектами, является чрезвычайно перспективным. В используемой конструкции фотоакустического детектора дополнительное увеличение чувствительности происходило за счет изменения общего давления в ячейке до 100 торр, поэтому все анализы производились при этом давлении. Перед измерениями с помощью поверочной смеси $\text{CO}_2\text{--N}_2$, содержащей известное количество CO_2 , проводилась калибровка фотоакустического детектора.

Для приготовления анализируемых образцов древесина каждого кольца состругивалась с помощью специально изготовленных стамесок, и навески 2–30 г помещались в экспозиционные камеры. Воздух из камер с древесными стружками откачивался до невысокого вакуума ($P \sim 0,1$ торр), и камеры оставались в таком состоянии до 40 мин, чтобы обеспечить максимальный выход сорбированных газов. По истечении времени экспозиции давление экстрагированной газовой смеси в камерах было ~ 20 торр. Во всех измерениях проба газа при $P = 8$ торр из экспозиционной камеры запускалась в вакуумизированную фотоакустическую ячейку и добавлялся воздух так, чтобы общее давление было 100 торр. Амплитуды сигналов от анализируемой смеси U_c и воздуха U_v регистрировались на выходе микрофона, определялось значение $\Delta U = U_c - U_v$ и с помощью калибровочного графика определялось содержание CO_2 в пробах газа для каждого кольца спиля.

Для подтверждения того, что CO_2 в исследуемых пробах был образован самим деревом, а не по-

ступил из атмосферы, был проведен изотопный анализ углерода CO_2 , выделенного при десорбции из нескольких колец одного спиля. Известно, что наземные растения (C_3 -типа) характеризуются диапазоном изотопного состава $\delta^{13}\text{C}$ приблизительно от -22 до -32% , а изотопный состав атмосферы в среднем составляет -7% [9].

Результаты эксперимента

Изотопный состав углерода CO_2 , выделенного при десорбции из колец древесины, определялся в лаборатории изотопной органической геохимии ТФ ФГУП СНИИГГИМС на автоматизированном измерительном комплексе на базе масс-спектрометра МИ-1201В. Химическая подготовка проб осуществлялась по стандартным аттестованным методикам химической подготовки органических веществ. Результаты были приведены к международному стандарту PDB, который представляет собой карбонат кальция белемнита позднемелового возраста из формации Пи-Ди (Южная Каролина).

Измерения показали, что проба обогащена легким изотопом ^{12}C до значений $\delta^{13}\text{C} = -32\%$. Был также измерен изотопный состав углерода древесины $\delta^{13}\text{C} = -22,5\%$, что является типичным для растений типа C_3 . Погрешность анализа составляла $\pm 0,1\%$. Таким образом, измерения показали, что извлекаемый из колец CO_2 не является привнесенным из атмосферы, а связан с протеканием метаболических процессов в дереве.

Предварительные измерения содержания CO_2 в кольцах спилов позволили сделать некоторые выводы о погодичном изменении CO_2 1) при изменении положения спиля на стволе и 2) при изменении ориентации радиуса на спиля. Были проведены измерения концентрации C_{CO_2} в кольцах трех спилов одного дерева (кедра), взятых на разных высотах. Оказалось, что полученные результаты (рис. 2) хорошо коррелируют друг с другом (коэффициент

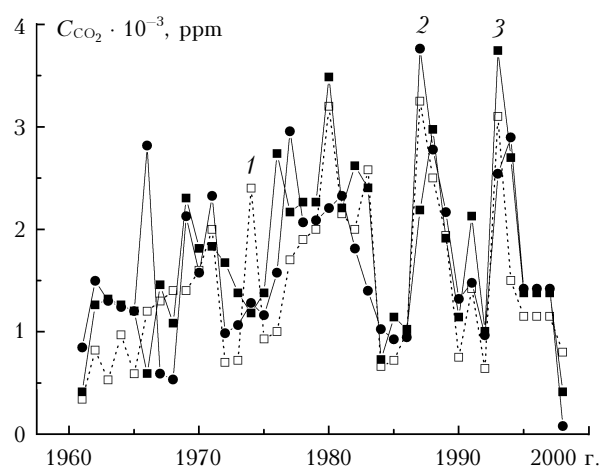


Рис. 2. Изменение концентрации CO_2 в кольцах кедрового спиля в зависимости от положения спиля на стволе: спил «а» (1), «б» (2), «с» (3)

корреляции $R_{CO_2-CO_2} = 0,63-0,75$), т.е. погодичное распределение CO_2 остается приблизительно постоянным для всех высот. (Авторы работы [10] объясняли отсутствие изменения с высотой содержания CO_2 в стволе живого дерева тем, что основная часть CO_2 привносилась транспирационным потоком из нижних частей ствола, а вклад от дыхания живых клеток незначителен). Содержание CO_2 в пробах варьировалось приблизительно от 400 до ~3500 ppm. Если аппроксимировать средние по трем спилам значения полученных концентраций CO_2 функцией Гаусса (рис. 3), то видно, что концентрация адсорбированного древесины CO_2 достигает максимальной величины около 1982 г.

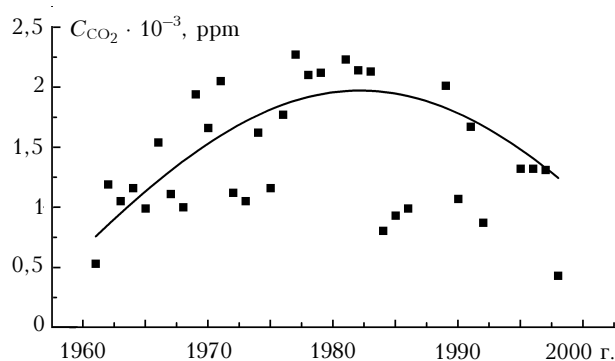


Рис. 3. Аппроксимация усредненных по трем спилам кедр значений концентраций CO_2 кривой Гаусса

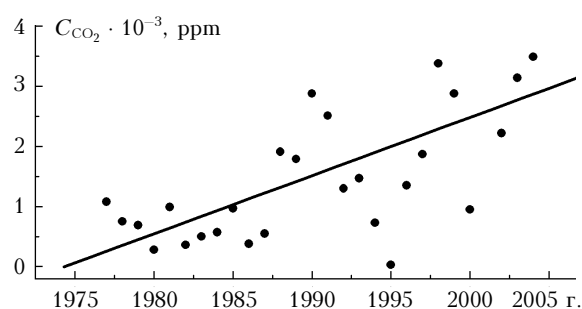
Для оценки зависимости изменения содержания CO_2 от выбранного направления радиуса на спиле были проведены измерения погодичной концентрации CO_2 по четырем радиальным направлениям произвольно выбранного спиля пихты (Нр 15). Измеренные величины концентраций за период 1980–2004 гг. коррелировали между собой с коэффициентами корреляции $R_{CO_2-CO_2} = 0,30-0,70$. Таким образом, содержание CO_2 в кольцах спилов деревьев можно, в первом приближении, считать не зависимым от направления радиуса на спиле и местоположения на стволе.

Результаты измерения содержания CO_2 в годичных кольцах спилов десяти пихт представлены на рис. 4–6.

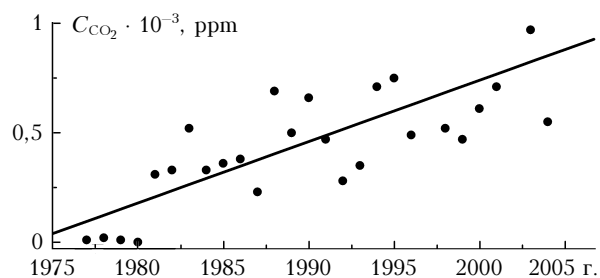
Ярко выраженный положительный тренд CO_2 в кольцах (1977–2004) спилов наблюдался только у двух пихт (Нр 14, Нр 16). Данные по остальным семи спилам можно было объединить по специфике поведения тренда CO_2 после 1985 г. (рис. 5), когда тренд CO_2 можно было считать отрицательным. Поэтому мы исследовали поведение среднего значения концентрации CO_2 для семи спилов пихт (Нр 11, 12, 13, 15, 17, 19, 20) (у восьмого спиля Нр 18 наблюдался большой разброс значений концентрации CO_2).

Результаты измерений концентрации CO_2 и их аппроксимация функцией Гаусса (кривая 1) представлены на рис. 6 совместно с данными по изме-

нению концентрации атмосферного CO_2 (кривая 2). Средний разброс данных при доверительной вероятности 0,8 попадает в диапазон $\pm 29\%$. Из рис. 6 видно, что погодичное распределение CO_2 имеет максимум, приблизительно датируемый 1986 г. К сожалению, центральная часть спилов сохранилась только для двух пихт (Нр 19, 20), для которых и были сделаны измерения концентрации CO_2 (∇), но для нескольких колец одновременно (приблизительно 10 лет), так как было трудно набрать по весу необходимое количество материала кольца в центральной части. В оставшемся спиле (Нр 18) картины тренда CO_2 по годам не наблюдалось, концентрация CO_2 варьировалась в диапазоне 200–1200 ppm.



а



б

Рис. 4. Изменение содержания CO_2 в кольцах спилов двух пихт: Нр 14 (а), Нр 16 (б)

Полученные результаты измерений содержания CO_2 в кольцах спилов пихт мы сравнили с известными результатами тренда атмосферного CO_2 по данным станции Мауна-Лоа. У двух пихт (Нр 14, 16) (рис. 7) наблюдается значительная корреляция изменения CO_2 в годовых кольцах спиля с изменением атмосферного CO_2 : $R_{спил-атм} = 0,68-0,76$ ($p < 0,0001$) в период 1977–2004 гг. По результатам измерения CO_2 в спилах семи пихт (см. рис. 6) также можно предположить, что, начиная с центральной части спиля, существует положительный тренд CO_2 приблизительно до 1986 г., а после 1986 г. наблюдается смена знака тренда на отрицательный.

Было проведено сравнение полученных результатов измерения CO_2 в годичных кольцах спилов пихт с динамикой ширины годичного кольца того же периода (рис. 8, 9). Оказалось, что погодичное

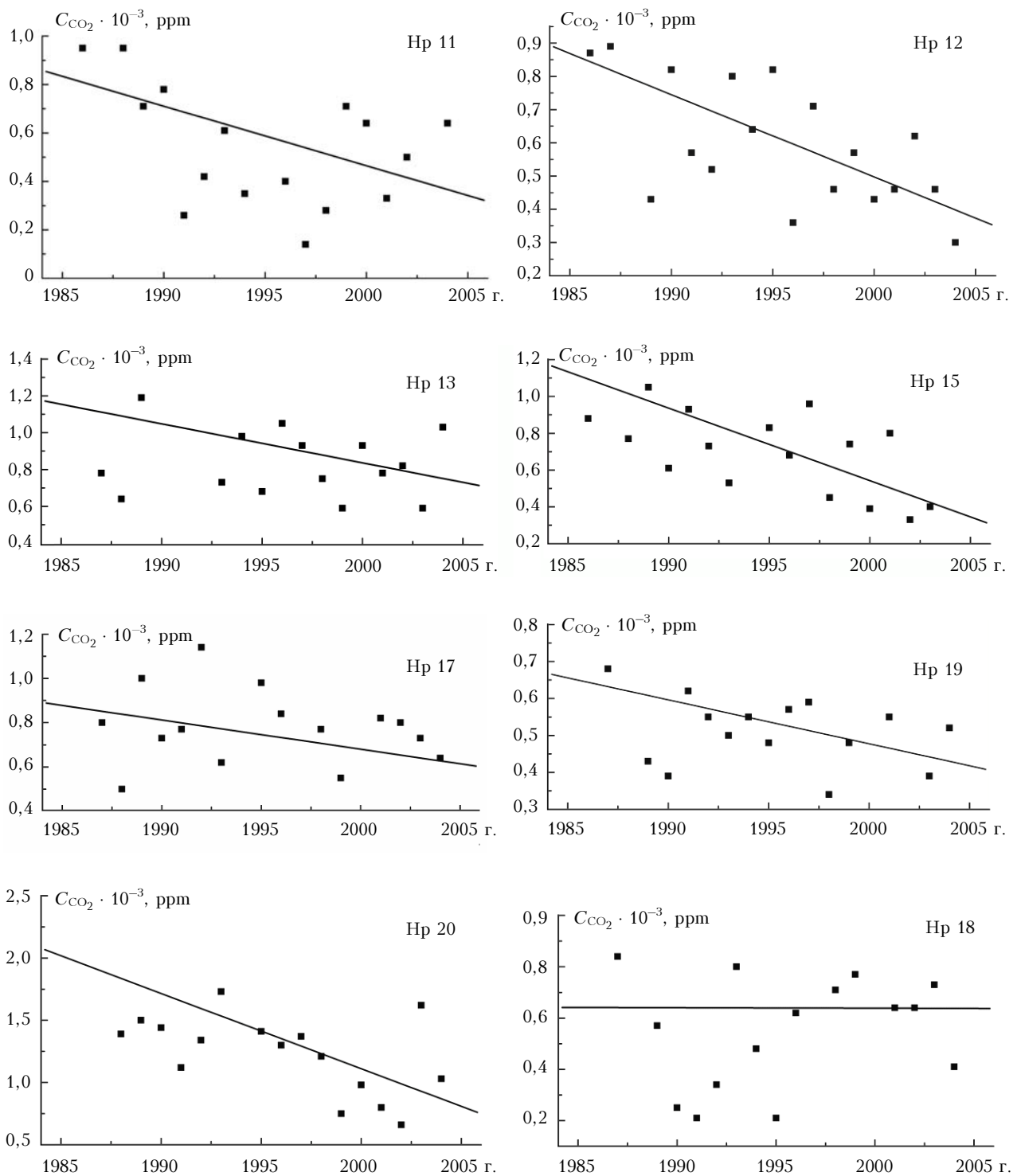


Рис. 5. Результаты измерений содержания CO₂ в годичных кольцах пихт после 1985 г.

распределение средних (для семи пихт) значений ширины кольца также имеет максимум (1991 г.), если его аппроксимировать функцией Гаусса, как и погодичное распределение CO₂ (~ 1986 г.). Иначе выглядит картина погодичного изменения шири-

ны кольца для спилов пихт, у которых наблюдался погодичный линейный рост CO₂ (см. рис. 9): видно, что на большей части этого временного интервала ширины колец не меняют своих параметров.

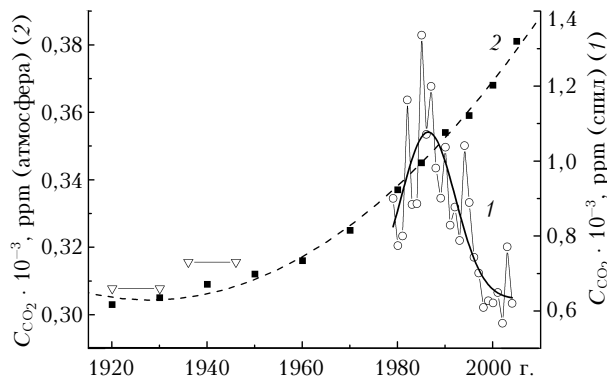


Рис. 6. Результаты измерений CO_2 (усредненного для семи пихт) при аппроксимации их функцией Гаусса (1). Треугольниками показаны данные для центральных частей спилов двух деревьев (Нр 19, 20) в сумме за 10 лет. Рост атмосферного CO_2 (2) представлен кривой регрессии данных по кернам льда (1920–1950 гг.) и измерений лаборатории Мауна-Лоа (Hawaii) (1960–2005 гг.) (<http://www.solar.coppe.ufrj.br/co2.html>)

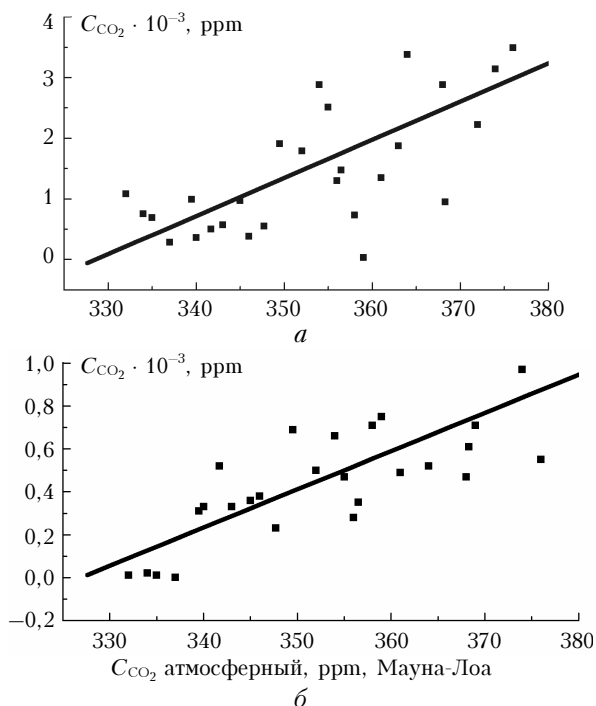


Рис. 7. Линейная корреляция между атмосферным (Мауна-Лоа) и CO_2 в спилах пихт Нр 14 (а) и Нр 16 (б) в период 1977–2004 гг.

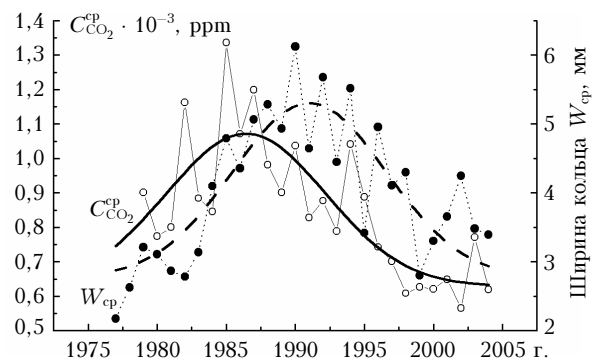


Рис. 8. Погодичное изменение усредненных для семи пихт значений ширин годовичного кольца $W_{\text{сп}}$ и концентраций CO_2 в кольцах

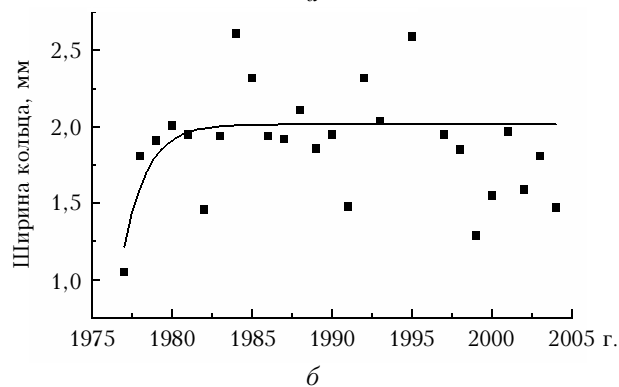
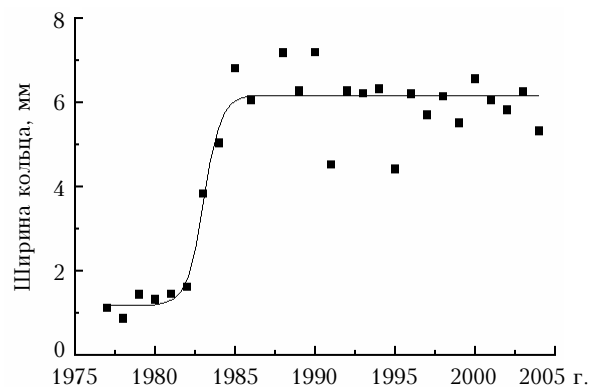


Рис. 9. Изменение ширины колец спилов Нр 14 (а) и Нр 16 (б), имеющих линейный рост CO_2 в период 1977–2004 гг.

Заключение

Пребывание спилов в течение долгого времени при атмосферных условиях должно было бы привести к тому, что за счет диффузных процессов избыточное содержание CO_2 в спиле пришло бы в равновесие с атмосферным.

Однако результаты измерений CO_2 , извлеченного вакуумным методом из годовичных колец старых спилов, показали, что 1) относительное содержание CO_2 в пробах газа в подавляющем большинстве случаев превышает содержание CO_2 в атмосферном воздухе, 2) в спилах существует погодичный тренд концентрации CO_2 : два спила имеют только положительный тренд, а тренд среднего значения концентрации CO_2 в кольцах семи спилов пихт (из десяти) изменяет со временем положительный знак на отрицательный и 3) у трех спилов одного дерева кедра, взятых с разных высот, наблюдались почти одинаковые картины погодичного распределения концентрации CO_2 .

Наблюдаемые тренды CO_2 , как нам кажется, связаны с ростом CO_2 в атмосфере. Постоянный рост атмосферного CO_2 должен уменьшать скорость диффузии CO_2 из ствола, таким образом приводя к его накоплению и, возможно, к изменению ряда внутренних метаболических процессов. Смена знака тренда, относящаяся примерно к 1986 г. и наблюдаемая у 70% пихт, видимо, сигнализирует о том, что содержание внутреннего CO_2 в стволе достигло

критической величины при данных условиях произрастания дерева, включая атмосферные. В живом дереве зафиксировать наличие такого тренда невозможно, а анализ погодично сорбированного древесного газа, по-видимому, может указать на его существование.

Интересно отметить, что картина со сменой знака тренда, приходящегося на 90-е гг., наблюдается рядом авторов, проводящих изотопный анализ углерода целлюлозы колец дерева [11, 12]. Авторы объясняют это явление тем, что до начала 90-х гг. шло обогащение биомассы деревьев легким изотопом ^{12}C как реакция растений на рост концентрации антропогенного CO_2 в атмосфере, а после 90-х произошла смена метаболических процессов и изотопный состав целлюлозы в большей степени стал обогащен тяжелым изотопом ^{13}C [12]. Возможно, отмеченная смена знака тренда у CO_2 и углерода целлюлозы является результатом общих метаболических процессов. Можно сделать еще одно предположение: существование постоянного источника CO_2 в месте произрастания деревьев (как, например, в [13]) будет маскировать динамику атмосферного CO_2 , тогда картина распределения CO_2 по кольцам спила, вероятно, будет другой.

Сравнение данных измерений погодичного содержания CO_2 в кольцах с шириной годичного кольца показало, что, во-первых, ход кривой распределения погодичного содержания CO_2 в кольцах (усредненного для семи пихт) аналогичен картине погодичного изменения средней ширины кольца, только со сдвигом приблизительно в 5 лет; во-вторых, у тех спилов, где наблюдался только погодичный линейный рост CO_2 , на большей части временного участка ширина кольца остается приблизительно постоянной.

Полученные результаты показали, что спилы содержат дополнительную ценную информацию, которая может быть использована при расчетах баланса CO_2 , однако для того чтобы сделать окончательные выводы, необходимо провести измерения CO_2 в пробах газа, содержащегося в кольцах спилов, на более продолжительном временном отрезке и на большем количестве спилов, взятых из разных мест.

Авторы выражают признательность Д.А. Савчуку за предоставление спилов и измерение ширины колец, В.В. Зуеву за поддержку работы, Т. Беттгер за консультацию, сотрудникам ТФ ФГУП СНИИГГИМС за проведение изотопного анализа.

1. Gartner B.L., Moore J.R., Gardiner B.A. Gas in stems: abundance and potential consequences for tree biome-

chanics // *Tree Physiol.* 2004. V. 24. N 11. P. 1239–1250.

2. Teskey R.O., McGuire M.A. Carbon dioxide transport in xylem causes errors in estimation of rates of respiration in stems and branches of trees // *Plant, Cell and Environ.* 2002. V. 25. N 11. P. 1571–1577.
3. McGuire M.A., Teskey R.O. Microelectrode technique for in situ measurement of carbon dioxide concentration in xylem sap of trees // *Tree Physiol.* 2002. V. 22. N 11. P. 807–811.
4. Поцина В.Д. Внутренние газы дерева и их роль в регуляции метаболических процессов // Проблемы физиологии и биохимии древесных растений: Тезисы докл. Красноярск: ИЛПД СО АН СССР, 1974. Вып. 1. С. 61.
5. Pruyn M.L., Gartner B.L., Harmon M.E. Within-stem variation of respiration in *Pseudotsuga menziesii* (Douglas-fir) trees // *New Phytologist.* 2002. V. 154. N 2. P. 359–372.
6. Levy P.E., Meir P., Allen S.J., Jarvis P.G. The effect of aqueous transport of CO_2 in xylem sap on gas exchange in woody plants // *Tree Physiol.* 1999. V. 19. N 1. P. 53–58.
7. Teskey R.O., Saeyn A., Stepe K., McGuire M.A. Origin, fate and significance of CO_2 in tree stems // *New Phytologist.* 2008. V. 177. N 1. P. 17–32 (<http://www.blackwell-synergy.com/doi/full/10.1111/j.1469-8137.2007.02286.x>).
8. Агеев Б.Г., Бондаренко С.Л., Зуев В.В., Савчук Д.А., Сапожникова В.А. Новый дендрохронологический параметр как результат оптико-акустических измерений концентрации CO_2 в годичных кольцах деревьев // Оптика атмосф. и океана. 2006. Т. 19. N 5. С. 465–468.
9. Галимов Э.М. Природа биологического фракционирования изотопов. М.: Наука, 1986. 247 с.
10. Teskey R.O., McGuire M.A. Measurement of stem respiration of sycamore (*Platanus occidentalis* L.) trees involves internal and external fluxes of CO_2 and possible transport of CO_2 from roots // *Plant, Cell and Environ.* 2007. V. 30. N 5. P. 570–579. doi:10.1111/j.1365-3040.2007.01649.x. (<http://www.blackwell-synergy.com/doi/full/10.1111/j.1365-3040.2007.01649.x>).
11. Бемтгер Т. Годичные кольца деревьев как архив изменения климата и окружающей среды – изотопно-дендрологические работы в Германии (Центральная Европа) // Новые методы в дендроэкологии: Тезисы докл. Иркутск: Изд-во Института географии им. Б.В. Сочавы СО РАН, 2007. С. 20–21.
12. Воронин В.И., Ивлев А.А. Дендрозотопные данные свидетельствуют о современном изменении климата на Земле // Новые методы в дендроэкологии: Тезисы докл. Иркутск: Изд-во Института географии им. Б.В. Сочавы СО РАН, 2007. С. 139–143.
13. Hättenschwiler S., Miglietta F., Raschi A., Körner C. Thirty years of in situ tree growth under elevated CO_2 : A model for future forest responses? // *Global Change Biology.* 1997. V. 3. N 5. P. 436–471.

B.G. Ageev, Yu.N. Ponomarev, V.A. Sapozhnikova. The CO_2 concentration trend in tree-rings and the atmospheric CO_2 .

In this work some assumptions about interpretation of measurement results of CO_2 in tree rings of old discs are suggested. Particularly, we assume that the obtained annual trend of CO_2 in the disc tree-rings is connected with atmospheric CO_2 rise.