

УДК 581.5+581.134.5:581.824+582.475+551.510.534

Возможности вклада хвойных лесов в межгодовые вариации атмосферного CO₂

Б.Г. Агеев¹, В.А. Сапожникова¹, А.Н. Груздев^{2*}

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

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

Поступила в редакцию 29.06.2020 г.

Выполнен анализ погодичных распределений CO₂ в газовых пробах, извлеченных под вакуумом из древесины годичных колец спилов ряда хвойных деревьев. Результаты указывают на то, что выделение CO₂ лесными сообществами в атмосферу может варьироваться с периодом ~4 года. Выделены две группы деревьев, в каждой из которых четырехлетние вариации CO₂ приблизительно синхронны, а вариации в разных группах противоположны по фазе. Вариации с периодами ~2 и ~4 года выявлены в рядах содержания CO₂ в атмосферном воздухе.

Ключевые слова: CO₂, цикличность, годичные кольца, хвойные деревья; CO₂, cyclicity, annual tree-rings, conifers.

Введение

В настоящее время существует большое количество моделей, описывающих поведение атмосферного CO₂, содержание которого растет и приводит к удлинению ростового сезона в умеренных и бореальных лесах. Основными причинами увеличения содержания CO₂ называют человеческую активность, выбросы от сжигания ископаемого топлива и от работы промышленных предприятий, вырубку лесов, землепользование [1]. Тем не менее сценарии роста содержания CO₂ в будущем имеют значительную неопределенность. Отчасти она связана с разбросом оценок влияния лесных экосистем на атмосферный CO₂. Так, согласно [2] расхождение между оценками поглощения атмосферного CO₂ лесными экосистемами составляет от 10 до 27%, а между оценками глобальных потоков углерода – до 100%. Сложность получения более точных оценок объясняется тем, что леса служат как стоком, так и источником углерода [3], а в выделении парниковых газов в атмосферу активную роль играют стволы деревьев [4], вклад которых в общее дыхание экосистем варьируется от 7 до 25% [5]. Изучение процессов выделения CO₂ лесами остается актуальным [6], так как они используют атмосферный CO₂ для фотосинтеза и влияют на климатическую систему через изменение скорости обмена H₂O и CO₂ с атмосферой и через изменение радиационного и теплового режимов земной поверхности [7]. Кроме

того, леса влияют на водный режим Земли, что проявляется в защите почвы от иссушения, в снижении пиков половодья и паводков [8]. Роль лесов в климатических изменениях можно понять лучше, если учесть влияние роста атмосферного CO₂ на устьичную проводимость [9] и особенности испарения, конденсации и переноса влаги над лесами [10].

Значительная часть бореальных и умеренных лесов (~20% всех лесов мира) находится в Сибири [11]. Оказывается, что сезонная динамика выделения CO₂ этими лесами отражается на кривой Ч.Д. Киллинга, которая соответствует вариациям концентрации CO₂ на фоновой станции обсерватории Мауна-Лоа (Гавайи) [12]. К особенностям лесов можно отнести и недавно зафиксированное над территорией Западной Сибири циклическое изменение концентрации CO₂ на уровне кронового пространства [13]. Однако сети постоянных наблюдений за вариациями CO₂ над лесами Сибири до сих пор нет, а ряды существующих измерений CO₂ пока очень коротки [11, 14]. Используя результаты наших измерений содержания остаточных газов в спилах стволов и корней хвойных деревьев, мы проанализировали CO₂-хронологию и выявили в них межгодовые вариации, в том числе с периодами ~2 и ~4 года. Такие вариации могут быть обусловлены изменением климатических параметров [15].

Можно предположить, что дыхание хвойных деревьев (включая корни и стволы), наряду с сезонным циклом, демонстрирует межгодовые вариации, период которых близок к периоду выявленных нами вариаций остаточного CO₂. Если такие вариации синхронны для разных деревьев или групп деревьев, то есть вероятность, что это отразится на содержании атмосферного CO₂.

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

Цели настоящей работы – анализ синхронности межгодовых вариаций содержания остаточного CO₂ в годичных кольцах спилов хвойных деревьев и анализ межгодовых вариаций содержания атмосферного CO₂.

1. Материалы и методы

Предметом анализа в работе служили полученные нами погодичные распределения (хронологии) CO₂ в спилах деревьев разных пород: сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), кедра сибирского (*Pinus sibirica* Du Tour), ели (*Picea obovata* Ledeb.) и двух лиственниц (*Larix sibirica* Ledeb.).

Сосна – основной лесообразующий вид Западной Сибири [16]. Исследуемые нами спилы сосны были взяты в Тимирязевском бору в 10–15 км к западу от Томска (юг Томской обл.) как с гривы (маркировка «Лес1», «Лес2», «Лес3»), так и с торфяной залежи [17]. Спил кедра сибирского и ели был взят в припоселковом кедровнике д. Трубачево Томского района (56°25' с.ш., 85°03' в.д.) [18]. Спилов лиственниц сибирских лиственниц были взяты в Томской обл. (Западная Сибирь, Россия) и возле пос. Черноруд (53°00' с.ш., 106°43' в.д. Иркутская обл., северо-западное побережье Среднего Байкала) – самого сухого места Прибайкалья: радиационный индекс сухости соответствовал сухим степям [19].

Методика и аппаратура, используемые нами, описаны в [15, 17–20]. Мы предложили измерять CO₂ в газовых пробах, извлекаемых вакуумным способом из древесины каждого кольца спила. Так как пористая структура древесины способна ежегодно сорбировать газовые составляющие жизнедеятельности дерева, такие как пары воды и выдыхаемый растением CO₂, то, извлекая газовые компоненты, можно было дополнительно к традиционным хронологиям ширины колец получить хронологию газов. Для извлечения газовой пробы древесина колец состругивалась и помещалась в экспозиционные камеры, в которых создавался кратковременный вакуум для стимулирования выхода сорбированных газов. Давление в полученной пробе контролировалось манометром.

Содержание CO₂ в пробах газа, извлеченных вакуумным методом из древесины колец, измерялось на лазерном оптико-акустическом спектрометре с компьютеризированной моделью перестраиваемого по частоте волноводного CO₂-лазера. Измерения выполнялись на линиях генерации полосы 10,6 мкм CO₂-лазера P(20, 16, 14), совпадающих с линиями поглощения CO₂. Результаты измерений CO₂ на трех линиях генерации лазера усреднялись. Вся система предварительно калибровалась смесью CO₂/N₂, содержащей известное количество CO₂; ошибка при калибровке не превышала ±5% [20]. Каждая серия измерений поглощения пробы газов сопровождалась измерениями фонового поглощения воздухом. Во всех случаях ширина годичных колец измерялась по двум радиусам на полуавтоматической установке LINTAB с точностью 0,01 мм.

Вариации CO₂ в полученных хронологиях исследовались с помощью кросс-спектрального анализа высокого разрешения методом максимальной энтропии и методом Фурье-анализа из графической программы ORIGIN. Для выявления синхронности предполагаемого выделения CO₂ в атмосферу (синхронного дыхания стволов и корней) использовались взаимные спектры содержания CO₂ в спилах различных пар деревьев (взаимная спектральная плотность, когерентность и фазовый сдвиг). Когерентность на какой-либо частоте – это аналог коэффициента корреляции между компонентами двух сигналов на указанной частоте, когда эти компоненты выровнены по фазе, т.е. когерентность характеризует максимально возможную статистическую связь компонентов.

2. Результаты

2.1. Оценка синхронности вариаций остаточного CO₂

Выявление синхронности дыхания стволов (и корней) деревьев производилось по 30 взаимным спектрам различных пар спилов. Главный интерес представляют вариации с периодом ~4 года. На рис. 1 представлены кросс-спектры CO₂ для спилов кедра, ели и двух лиственниц (Томск, Черноруд) за один и тот же 55-летний период времени. Они показывают, что четырехлетние колебания CO₂ в древесине лиственницы из Томской обл. примерно совпадают по фазе с колебаниями CO₂ в древесине кедра (рис. 1, а), а колебания CO₂ в древесине лиственницы из Черноруда и ели происходят в противофазе с колебаниями CO₂ в древесине кедра (рис. 1, б, в). Как результат, колебания CO₂ в древесине лиственниц из разных регионов должны быть противофазны, что подтверждается рис. 1, г.

Сводка основных результатов кросс-спектрального анализа для четырехлетних вариаций приведена в таблице. Большие значения когерентности указывают на наличие статистической связи четырехлетних вариаций CO₂ в двух хронологиях. Из таблицы видно, что в большинстве таких случаев разность фаз между вариациями CO₂ составляет 0, π/4, π или 3π/4. Нулевой фазовый сдвиг означает, что четырехлетние вариации в двух хронологиях синхронны, фазовый сдвиг на величину π, соответствующий для четырехлетнего периода сдвигу на 2 года, означает, что вариации противофазны. Фазовые сдвиги π/4 и 3π/4 соответствуют годовому сдвигу одного из пары сигналов относительно его софазного и противофазного поведения по отношению к другому сигналу. Заметим, что модуль коэффициента корреляции между гармоническими по форме сигналами одинакового периода, сдвинутыми относительно друг друга по фазе на π/4 или 3π/4, составляет 0,7. Поэтому можно полагать, что положительная корреляционная связь между когерентными четырехлетними вариациями CO₂ сохраняется в интервале фазового сдвига (0 ± π/4). Аналогично полагаем, что отрицательная

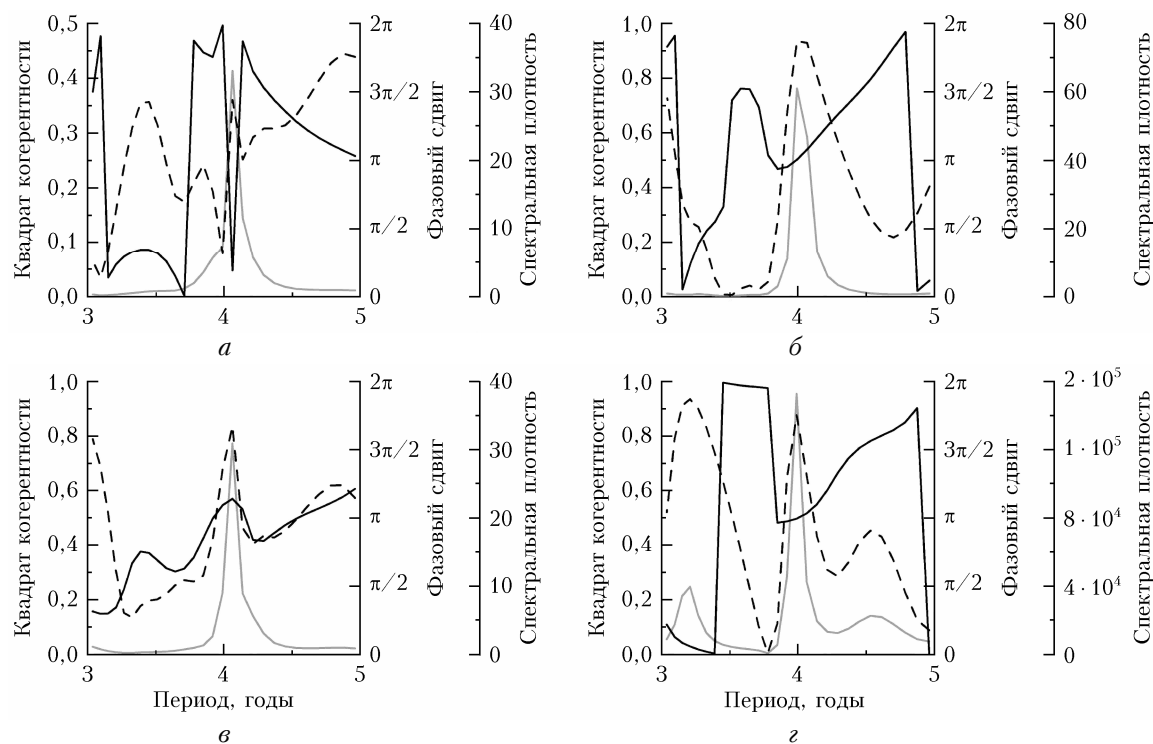


Рис. 1. Кросс-спектры CO_2 -хронологий для пар кедр – лиственница (а), кедр – лиственница из Черноруда (б), кедр – ель (в) и лиственница – лиственница из Черноруда (z): взаимная спектральная плотность (серые кривые), квадрат когерентности (штриховые кривые) и фазовый сдвиг (сплошные черные кривые)

Характеристики статистической связи (квадрат когерентности/фазовый сдвиг) между четырехлетними вариациями CO_2 в спилах различных пар деревьев (маркировки «Лес» и «Торф» относятся к соснам)

Дерево	Лиственница	Лиственница (Черноруд)	Ель	«Лес1»	«Лес2»	«Лес3»	«Торф1»	«Торф2»	«Торф3»
	1939–1994	1939–1994	1939–1994	1979–1994	1979–1994	1981–1994	1970–1994	1970–1994	1968–1994
Кедр	0,9/~0	0,9/ π	0,8/ π	~1/~ $\pi/4$		~1/~ $3\pi/4$	1/~0	0,7/ $\pi/2$	~1/0
	1939–1994	1939–1994	1979–2008	1983–2008	1981–1994	1970–2008	1970–2008	1970–2008	1968–2008
Лиственница		0,9/ π	0,8/ π	0,8/ $\pi/4$		~0,8/ $3\pi/4$	0,7/~0		0,6/~ $\pi/4$
		1939–1994							
Лиственница (Черноруд)			~1/0						
			1979–2004	1983–2004	1981–2004	1970–2004	1970–2004	1970–2004	1968–2004
Ель							~1/ π		~1/ π
							1970–2014	1970–2014	
«Торф1»							0,9/~ $\pi/4$	~1/~0	
								1970–2014	
«Торф2»								0,5/~ $\pi/4$	

корреляционная связь сохраняется в таком же сдвиговом интервале, если его отсчитывать относительно противофазного положения вариаций. Таким образом, согласно представленным результатам, четырехлетние вариации CO_2 в хронологиях, для которых при попарном анализе получена достаточно высокая спектральная когерентность, в большинстве случаев с точностью до одного года согласованы и происходят примерно в фазе или противофазе друг с другом.

Полагая, что хронологии CO_2 в годичных кольцах отражают динамику стволового дыхания, можно предположить возможность четырехлетней модуля-

ции выделения CO_2 хвойными деревьями в атмосферу. Таблица демонстрирует примерно одинаковую частоту софазного и противофазного (с точностью до $\pi/4$) соотношения четырехлетних вариаций CO_2 . Поэтому нельзя выделить доминирующий режим вариаций, но очевидно, что в общем массиве хвойных лесов выделяются две группы, стволовое дыхание которых имеет четырехлетние вариации. При этом вариации в двух группах противоположны друг другу. Доля этих групп в общей массе хвойных лесов не определялась.

Если доля групп с когерентными четырехлетними вариациями стволового CO_2 в общей массе

лесов значительна, то можно предположить, что они влияют на атмосферное содержание CO_2 в регионе. Тогда возможно наличие в атмосферном CO_2 четырехлетних (если вклад четырехлетних вариаций какой-либо из групп заметно доминирует) и двухлетних (в более общем случае) вариаций.

Перейдем к анализу вариаций содержания атмосферного CO_2 .

2.2. Анализ CO_2 -хронологий

Наиболее полный массив данных о CO_2 в Западной Сибири получен по результатам измерений с самолета [14, 21]. Обнаружено увеличение концентрации CO_2 в минимумах (лето) начиная с 2005 г., что заставило авторов [14] сделать предположение о возможном достижении уровня насыщения ассимиляции CO_2 лесами. Мы оцифровали приведенные

в [21] графики концентрации CO_2 на высотах 0,5, 3 и 7 км. Региональные источники и стоки CO_2 в большей степени должны влиять на концентрацию CO_2 на высоте 0,5 км и в меньшей степени — на концентрацию на высоте 7 км.

На рис. 2 представлены Фурье-спектры минимальных (лето) и максимальных (зима) значений концентрации CO_2 за 1998–2019 гг. В большинстве спектров наблюдается максимум в диапазоне 3–4,5 лет, а в спектре минимальных значений концентрации CO_2 на высоте 0,5 км выделяется двухлетний максимум. Учитывая результаты кросс-спектрального анализа остаточного содержания CO_2 в стволах деревьев, полагаем, что двухлетние вариации минимальных (летних) значений содержания CO_2 на высоте 0,5 км могут быть обусловлены четырехлетней модуляцией стволового дыхания хвойных лесов, которое наиболее активно в вегетационный

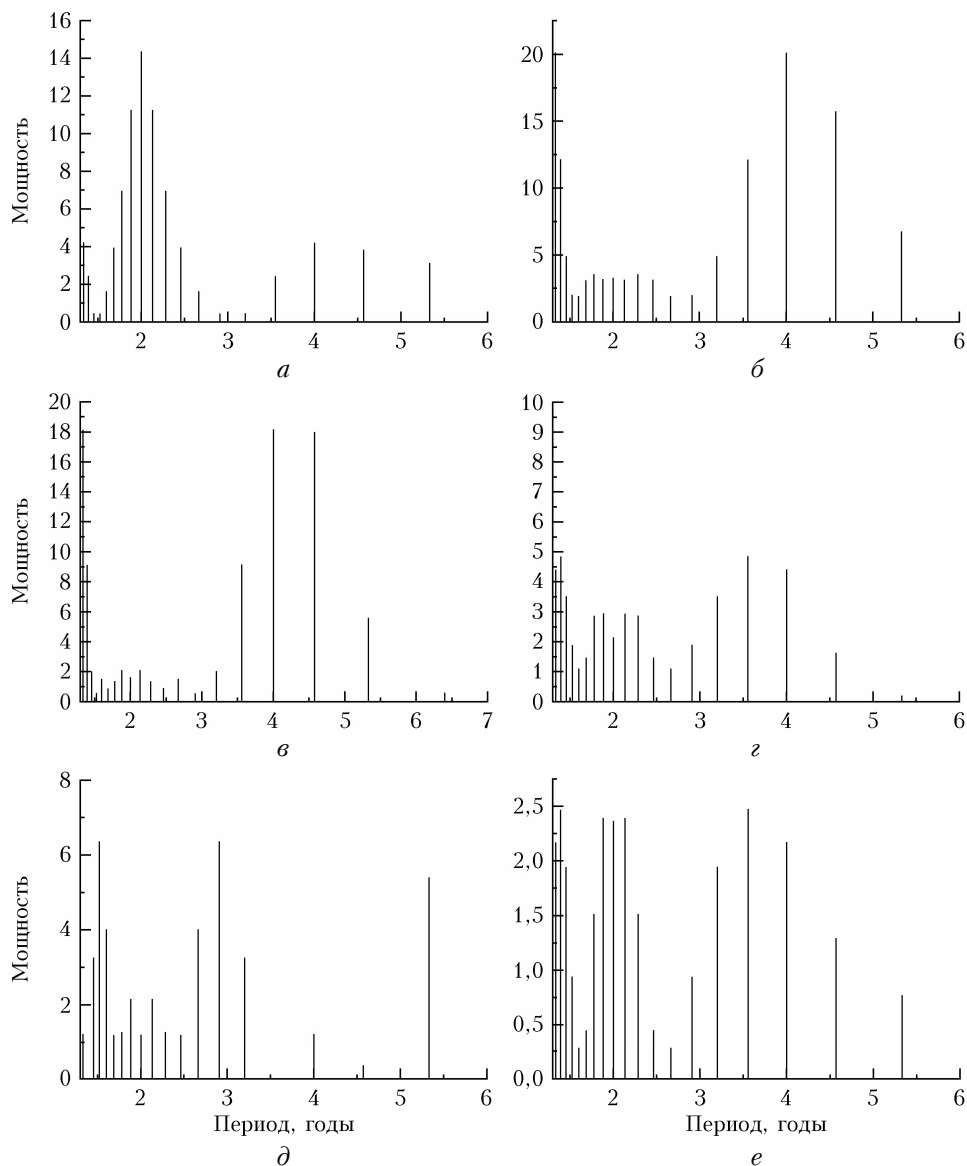


Рис. 2. Результат Фурье-анализа данных самолетного зондирования CO_2 [21] на высотах 0,5 (а, б); 3 (в, г) и 7 км (д, е): ряды минимальных летних (а, в, д) и зимних (б, г, е) значений CO_2

период года. Вариации CO_2 большего периода на разных высотах, кроме летних вариаций на высоте 0,5 км, вероятно, не связаны с вариациями остаточного CO_2 в стволах деревьев.

Для сопоставления с результатами анализа для Западной Сибири мы привлекли также данные измерений концентрации CO_2 на южном японском о-ве Хатерума (24° с.ш., 124° в.д.) за период 1993–2018 гг. [22] и на обсерватории Мауна-Лоа, расположенной на высоте 3400 м над ур. м. на лишенном растительности о-ве Гавайи в Тихом океане ($19,5^\circ$ с.ш., 157° в.д.), за 1958–2018 гг. [12]. Сопоставление с результатами анализа данных для столь удаленного региона, как о-в Гавайи, интересно по следующей причине. Согласно [23] вследствие сезонности крупномасштабной атмосферной цирку-

ляции обсерватория Мауна-Лоа зимой чаще находится под влиянием воздушных масс, пришедших из Евразии, а летом — под влиянием воздушных масс из Северной Америки.

Фурье-спектр оцифрованных данных по CO_2 на ст. Хатерума приведен на рис. 3. Он указывает на наличие в концентрации CO_2 вариаций с периодами ~ 2 и ~ 4 года.

Ряд CO_2 на ст. Мауна-Лоа существенно длиннее, чем два предыдущих ряда, и, кроме того, имеет лучшее разрешение по времени, позволяющее использовать для спектрального анализа среднемесячные значения содержания CO_2 . Фурье-спектры концентрации CO_2 на ст. Мауна-Лоа для ряда месяцев, соответствующих холодным сезонам в средних широтах Северного полушария, представлены на рис. 4.

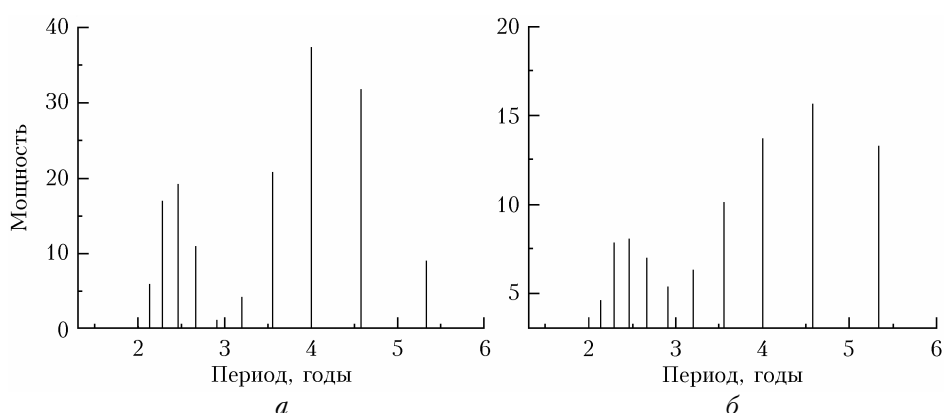


Рис. 3. Результаты Фурье-анализа оцифрованных CO_2 -хронологий на станции о-ва Хатерума: ряды максимальных летних (а) и зимних (б) значений CO_2

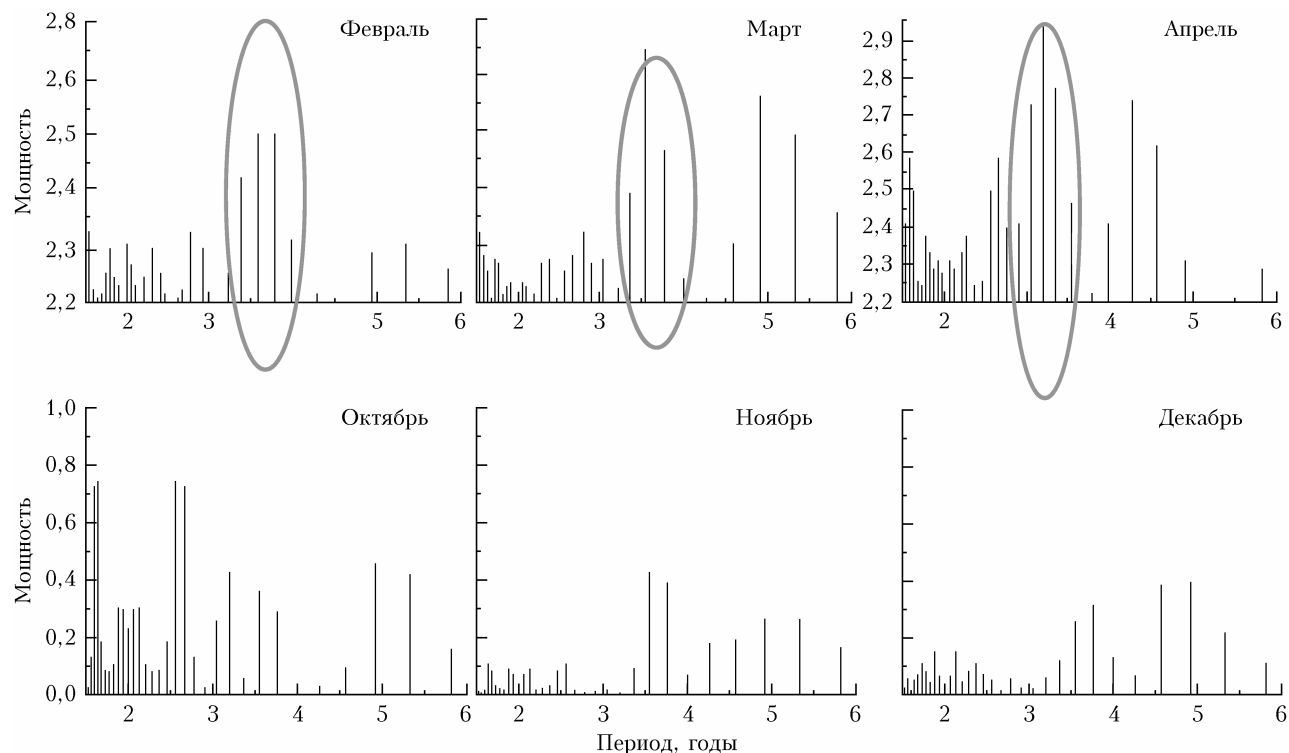


Рис. 4. Фурье-спектры среднемесячных значений концентрации CO_2 на обсерватории Мауна-Лоа для разных месяцев

Данные на рис. 4 указывают на наличие вариаций CO₂ с периодом ~3,5 года, что качественно согласуется с результатами анализа вариаций CO₂ в Западной Сибири.

Заключение

Согласно результатам анализа для части хвойных деревьев, характерных для лесных сообществ Западной Сибири, выявлены синхронные (с точностью до 1 года) четырехлетние колебания содержания CO₂, сохранившегося в годичных кольцах стволов деревьев. Такие деревья можно объединить в две группы, колебания CO₂ в которых примерно противофазны друг другу. Если вариации остаточного CO₂ в годичных кольцах отражают динамику стволового дыхания деревьев, полагаем, что обмен CO₂ между таким деревом и атмосферой испытывает четырехлетние колебания. Тогда с учетом двух групп деревьев с противоположными колебаниями стволового CO₂ возможно наличие двух- и четырехлетних вариаций содержания атмосферного CO₂ в регионе.

Двухлетняя цикличность выявлена в минимальных летних значениях содержания CO₂ на высоте 0,5 км в Западной Сибири, и ее можно связать с указанными особенностями стволового дыхания хвойных деревьев в регионе.

Наряду с этим в минимальных и максимальных значениях содержания CO₂ в слое 0,5–7 км обнаружены вариации с периодом 3–4,5 года, которые, по-видимому, не связаны с процессами стволового дыхания. Такие же вариации выявлены в приземном содержании CO₂ на о-ве Хатерума и на высокогорной обсерватории Мауна-Лоа на о-ве Гавайи. Связь этих вариаций с вариациями CO₂ в тропосфере Западной Сибири требует специального анализа.

Результаты исследований говорят о том, что выделение CO₂ лесами в атмосферу может иметь периодическую четырехлетнюю составляющую. Ее корректное определение и установление ее связи с дыханием лесов требует продолжительных измерений содержания CO₂ в атмосфере над лесами, под пологом леса и над лесными почвами.

Работа выполнена в рамках госзадания ИОА СО РАН.

1. Le Quéré C., Andrew R.M., Friedlingstein P., Sitch S., Pongratz J., Manning A.C., Korsbakken J.I., Peters G.P., Canadell J.G., Jackson R.B., Boden T.A., Tans P.P., Andrews O.D., Arora V.K., Bakker D.C.E., Barbero L., Becker M., Betts R.A., Bopp L., Chevallier F., Chini L.P., Ciais P., Cosca C.E., Cross J., Currie R., Gasser T., Harris I., Hauck J., Haverd V., Houghton R.A., Hunt C.W., Hurtt G., Ilyina T., Jain A.K., Kato E., Kautz M., Keeling R.F., Goldewijk K.K., Körtzinger A., Landschützer P., Lefèvre N., Lenton A., Lienert S., Lima I., Lombardozi D., Metzl N., Milleiro F., Monteiro P.M.S., Munro D.R., Nabel J.E.M.S., Nakaoka S.-I., Nojiri Yu., Padin X.A., Peregon A., Pfeil B., Pierrot D., Poulter B., Rehder G., Reimer J., Rödenbeck C., Schwingler J., Séférian R., Skjelvan I., Stocker B.D., Tian H., Tilbrook B., Tubiello F.N., van

- der Laan-Luijkx I.T., van der Werf G.R., van Heuven S., Viovy N., Vuichard N., Walker A.P., Watson A.J., Wiltshire A.J., Zaehle S., Zhu Dan. Global Carbon Budget 2017 // Earth Syst. Sci. Data. 2018. V. 10. P. 405–448. DOI: 10.5194/essd-10-405-2018.
2. Бурков В.Д., Крапивин В.Ф., Шалаев В.С. Роль лесных экосистем в регулировании парникового эффекта // Лесной вестник. 2008. Т. 1. С. 20–31.
3. Barkhatov Y.V., Belolipetsky P.V., Degermendzhi A.G., Belolipetskiy V.M., Verkhovets S.V., Timokhina A.V., Panov A.V., Shchemel A.L., Vedrova E.F., Trephilovala O.V. Modeling of CO₂ fluxes between atmosphere and boreal forest // Proc. Environ. Sci. 2012. V. 13. P. 621–625.
4. Barba J., Poyatos R., Vargas R. Automated measurements of greenhouse gases fluxes from tree stems and soils: magnitudes, patterns and drivers // Sci. Rep. 2019. V. 9, N 1. P. 1–13. DOI: 10.1038/s41598-019-39663-8.
5. Darenova E., Szatniewska J., Acosta M., Pavelka M. Variability of stem CO₂ efflux response to temperature over the diel period // Tree Physiol. 2019. V. 39, N 5. P. 1–11. DOI: 10.1093/treephys/tpy134/5265337.
6. Tang J., Bolstad P.V., Desai A.R., Martin J.G., Cook B.D., Davis K.J., Carey E.V. Ecosystem respiration and its components in an old-growth forest in the Great Lakes region of the United States // Agric. For. Meteorol. 2008. V. 148. P. 171–185. URL: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2007.08.008>.
7. Ольчев А.В. Поток CO₂ и H₂O в лесных экосистемах в условиях изменяющегося климата (оценка с применением математических моделей): дисс. ... докт. биол. наук. М.: Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова, 2015. 306 с. URL: http://www.sevin.ru/dissertations/submitted/2015_Olchev/Olchev.pdf.
8. Ellison D., Morris C.E., Locatelli B., Sheil D., Cohen J., Murdiyarso D., Gutierrez V., van Noordwijk M., Greed E.F., Pokorny J., Gaveau D., Spracklen D.V., Tobella A.B., Ilsted U., Teuling A.J., Gebrehitwoot S.G., Sands D.C., Muys B., Verbist B., Springgay E., Sugandi Yu., Sullivan C.A. Trees, forests and water: Cool insights for a hot world // Global Environ. Change. 2017. V. 43. P. 51–61. URL: <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2017.01.002>.
9. Kooperman G.J., Chen Y., Hoffman F.M., Koven C.D., Lindsay K., Pritchard M.S., Swann A.L.S., Randerston J.T. Forest response to rising CO₂ drives zonally asymmetric rainfall change over tropical land // Nat. Clim. Change. 2018. V. 8. P. 434–440.
10. Makarieva A.M., Gorshkov V.G. Biotic pump of atmospheric moisture as driver of the hydrological cycle on land // Hydrol. Earth Syst. Sci. 2007. V. 11. P. 1013–1033.
11. Тимохина А.В., Прокушкин А.С., Панов А.В., Колосов Р.А., Сиденко Н.В., Лаврич Й., Хайманн М. Межгодовая изменчивость концентрации диоксида углерода в атмосфере над центральной частью Сибири (по данным международной обсерватории ZOTTO за 2009–2015 гг.) // Метеорол. и гидрол. 2018. № 5. С. 20–29.
12. URL: <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/graph.html> (last access: 29.05.2020).
13. Воронин П.Ю., Мухин В.А., Коновалов П.В., Седельников В.П., Кузнецов Вл.Ю. Ограничение стока углерода в лесные экосистемы Западной Сибири // Докл. АН. 2015. Т. 460, № 4. С. 486–487.
14. Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Давыдов Д.К., Креков Г.М., Фофанов А.В., Бабченко С.И., Inoue G., Machida T., Maksutov Sh., Sasakava M., Shimoyama K.

- Динамика вертикального распределения парниковых газов в атмосфере // Оптика атмосф. и океана. 2012. Т. 25, № 12. С. 1051–1061.
15. Сапожникова 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. АН. 2013. Т. 450, № 5. С. 1–7.
 16. Паневин В.С. Леса и лесное хозяйство Томской области. Томск: Изд-во Томс. ун-та, 2006. 126 с.
 17. Агеев Б.Г., Сапожникова В.А., Груздев А.Н., Головатская Е.А., Дюкарев Е.А., Савчук Д.А. Сравнение характеристик остаточных газов в годичных кольцах деревьев сосны // Оптика атмосф. и океана. 2019. Т. 32, № 2. С. 105–112; Агеев В.Г., Сапожникова В.А., Груздев А.Н., Головатская Е.А., Дюкарев Е.А., Савчук Д.А. Comparison of residual gas characteristics in annual rings of scots pine trees // Atmos. Ocean. Opt. 2019. V. 32, N 3. P. 275–283.
 18. 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 атмосф. и океана. 2011. Т. 24, № 2. С. 149–154; Агеев В.Г., Зотикова А.П., Падалко Н.Л., Пономарев Ю.Н., Савчук Д.А., Сапожникова В.А., Черников Е.В. 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.
 19. Ageev B., Ponomarev Yu., Sapozhnikova V., Savchuk D. A laser photoacoustic analysis of residual CO₂ and H₂O in larch stems // Biosensors. 2015. V. 5. P. 1–12. DOI: 10.3390/bios5010001.
 20. Ageev B.G., Gruzdev A.N., Sapozhnikova V.A. Cyclic variation of residual (CO₂ + H₂O) and total pressure in conifer stem and woody root tree rings // J. Sib. Fed. Univ. Biology. 2018. V. 11, N 3. P. 206–217. URL: <http://journal.sfu-kras.ru/number/72132>.
 21. Антохина О.Ю., Антохин П.Н., Аришинова В.Г., Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Белан С.Б., Давыдов Д.К., Дудорова Н.В., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Краснов О.А., Максюттов Ш.Ш., Machida T., Панченко М.В., Пестунов Д.А., Рассказчикова Т.М., Савкин Д.Е., Sasakawa Motoki, Симоненков Д.В., Скляднева Т.К., Толмачев Г.Н., Фофонов А.В. Исследование динамики парниковых газов на территории Западной Сибири // Оптика атмосф. и океана. 2019. Т. 32, № 9. С. 777–785.
 22. URL: <http://db.cger.nies.go.jp/portal/ggtus/hateruma> (last access: 29.05.2020).
 23. Buermann W., Lintner B.R., Koven C.D., Angert A., Pinzon J.E., Tucker C.J., Fung I.Y. The changing carbon cycle at Mauna Loa Observatory // PNAS. 2007. V. 104, N 11. P. 4249–4254. URL: <https://doi.org/10.1073/pnas.0611224104>.

B.G. Ageev, V.A. Sapozhnikova, A.N. Gruzdev. **Possibility of contribution of conifers to interannual CO₂ variations in the atmosphere.**

Analysis of the annual CO₂ distribution in the gas samples vacuum-extracted from the tree-ring wood of several conifer discs has been performed. The results indicate that part of CO₂ released by forest communities into the atmosphere can vary with a period of about 4 years. Two groups of trees were identified, in each the 4-year CO₂ variations are approximately synchronous, and the variations in different groups are opposite in phase. Variations with periods of about 2 and 4 years were revealed in the series of CO₂ content in the atmospheric air.