

## Сравнение характеристик остаточных газов в годичных кольцах деревьев сосны

Б.Г. Агеев<sup>1</sup>, В.А. Сапожникова<sup>1</sup>, А.Н. Груздев<sup>2</sup>, Е.А. Головацкая<sup>3</sup>,  
Е.А. Дюкарев<sup>3,4</sup>, Д.А. Савчук<sup>3\*</sup>

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

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

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

<sup>4</sup>Югорский государственный университет  
628012, г. Ханты-Мансийск, ул. Чехова, 16

Поступила в редакцию 26.12.2018 г.

В работе сравниваются хронологии CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, общего давления проб, извлекаемых под вакуумом из годичных колец древесины спилов шести сосен одного региона произрастания, и приводятся результаты анализа. Показано, что спилы имеют различные погодичные распределения CO<sub>2</sub>, данные по H<sub>2</sub>O слабо коррелируют с осадками, но общей для всех анализируемых хронологий является выявляемая цикличность.

Ключевые слова: CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, цикличность, годичные кольца, сосна; CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, cyclicity, tree rings, *Pinus sylvestris*.

### Введение

Вопросы биосферно-атмосферных взаимодействий продолжают оставаться на повестке дня в связи с глобальными и региональными изменениями климата. Особый интерес представляет изучение реакций лесных экосистем на климатические изменения [1–3]. Хронологии ширины годичных колец деревьев (радиального прироста) широко используются для климатических реконструкций и оценки реакции древостоев на климатические аномалии [4]. В экстремальных условиях (верхняя, полярная, лесостепная и другие границы леса, заболоченные, затапливаемые, скальные местообитания и т.д.) радиальный прирост особенно заметно реагирует на изменение климатических факторов [5, 6]. Осадки вегетационного периода предыдущего года, например, отчетливо сказались на приросте в высоту сосны обыкновенной на верховых болотах [7]. Данные наблюдений и модельные расчеты показывают, что климат территории России более чувствителен к глобальному потеплению, чем климат многих других регионов земного шара, а прогнозируемое вековое потепление [5. С. 157] в перспективе может вызвать перемещение границы леса к северу в европейской части

России и значительно сократить площадь лесов в Сибири [5].

В последнее время пристальное внимание стали уделять цикличности в климатических и древесно-кольцевых хронологиях [1, 8, 9] и нахождению соответствия между ними [10]. Так, у хвойных деревьев наиболее часто в индексах радиального прироста встречаются 4-, 7-, 18-летние циклы, у лиственных – 3-, 5- и 11-летние, а циклическая структура хронологий прироста практически полностью совпадает с режимом увлажнения (район Среднего Поволжья) [11]. Вариации газовых компонентов, сохраняющихся в древесных кольцах спилов (CO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> + H<sub>2</sub>O), также носят явно выраженный циклический характер, что указывает на их возможное циклическое поступление в атмосферу [10, 12–14]. Однако эта тема еще недостаточно изучена.

Цель настоящей работы – нахождение особенностей поведения газовых компонентов в спилах деревьев сосны, близко произраставших на одном участке леса, а также сравнение найденных хронологий с вариациями ширины колец.

### Материалы и методы

#### Характеристика участков произрастания и спилов

Объект исследования – спилы сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) как основного лесобразующего вида в Западной Сибири [15], взятые в Тимирязевском бору в 10–15 км к западу от Томска (юг

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

Томской обл.). На первом участке сосны произрастали на минеральной почве на возвышенном участке (грива) и упали после ветровала в 2015 г. Спилы с трех таких деревьев (маркированы «лес1», «лес2», «лес3» в табл. 1) сделаны в мае 2017 г. Другой участок в 200 м от первого представлял собой торфяную залежь на окраине болота, где мощность торфа составляла около 1 м. Разность высот между песчаной гривой и поверхностью заторфованного участка — около 10 м. В осенне-зимний период 2014–2015 гг. на этом участке произошел пожар, в результате которого торф выгорел и сосны упали. Здесь в мае 2017 г. также были взяты спилы с трех деревьев (отмечены как «торф1», «торф2», «торф3» в табл. 1). Сердцевина спилов немного смещена от центра, поэтому средняя ширина годичного кольца несколько различается по противоположным радиусам. Количество годичных колец на исследуемых спилах — от 42 до 49. Так как спилы со всех деревьев брались на расстоянии 1 м от корневой системы, можно считать, что все деревья молодые и их возраст составляет порядка 50–55 лет.

### Эксперимент и методы обработки

Наша экспериментальная установка и процедура измерений  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$  в древесине колец спилов ранее описана в литературе [10, 12–14]. Измерения осуществлялись с помощью компьютеризированного оптико-акустического лазерного спектрометра с перестраиваемым по частоте волноводным  $\text{CO}_2$ -лазером. После калибровки системы, т.е. измерения поглощения газов с известной концентрацией и нахождения калибровочного коэффициента, можно было определить неизвестную концентрацию в анализируемой пробе газа. Перестройка частоты генерации, запись сигнала детектора и предварительная обработка (усреднение, определение отношения) осуществлялись специальной программой. Результаты измерений сохранялись как файл для соответствующих линий лазера, и дополнительно информация о спектре появлялась на мониторе компьютера. Предельная чувствительность по коэффициенту поглощения используемого спектрометра была  $2 \cdot 10^{-5} \text{ см}^{-1}$  для мощности лазера 70 мВт, ошибка при калибровке не превышала  $\pm 5\%$ .

Для извлечения газовой пробы из колец древесины каждого кольца состругивалась с помощью спе-

циальных стамесок, последовательно помещалась в четыре плотно закрываемые экспозиционные камеры, в которых создавался кратковременный вакуум для стимулирования выхода сорбированных газов, давление полученной таким образом пробы можно было контролировать манометром. В данном эксперименте были исследованы пробы 254 колец спилов сосен. Каждая серия измерений поглощения образцом газов, экстрагированных из древесины колец, сопровождалась измерением фонового поглощения воздухом. Измерения выполнялись на четырех линиях генерации перестраиваемого волноводного 10,6 мкм  $\text{CO}_2$ -лазера  $P(20, 16, 14)$  и  $R(20)$ , совпадающих с линиями поглощения  $\text{CO}_2$  ( $P$ ) и с линией поглощения водяных паров ( $R$ ). Содержание  $\text{CO}_2$  усреднялось по данным измерений на трех линиях генерации лазера, коэффициент корреляции между которыми 0,85–0,90. Так как на линии генерации  $R(20)$  можно было регистрировать сигнал суммы компонент ( $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ ), то вычитание сигнала от  $\text{CO}_2$  позволяло найти распределение  $\text{H}_2\text{O}$  по кольцам.

Ширина годичных колец измерялась на зашлифованной поверхности каждого спила по двум противоположным (наибольшему и наименьшему) радиусам на полуавтоматической установке LINTAB с точностью 0,01 мм. Затем данные по каждому радиусу усреднялись для получения обобщенной древесно-кольцевой хронологии по каждому спилу (дереву).

Для оценки циклических вариаций в полученных хронологиях  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$  в кольцах спилов и их изменений во времени применялся спектральный и кросс-спектральный анализ высокого разрешения по методу максимальной энтропии (долговременные тренды исключались). Для выделения циклической составляющей также использовался Фурье-анализ пакета программ ORIGIN.

### Результаты

Исходные ряды радиального прироста, полученные в результате измерения ширины годичных колец по взаимно противоположным радиусам для каждого спила (дерева), достоверно высоко коррелируют друг с другом (коэффициент корреляции  $R = 0,68–0,89$  для группы спилов «лес» и  $R = 0,64–0,94$  для группы спилов «торф» при

Таблица 1

Характеристика спилов сосны

Спил	Место произрастания дерева	Диаметр спила в коре / без коры, см	Толщина спила, см	Год последнего кольца	Количество годичных колец	Средняя ширина колец, мм*
«Лес1»	Грива	20/19,5	3	2015	44	2,6/1,9
«Лес2»	Грива	20/19,5	5	2015	44	2,6/1,9
«Лес3»	Грива	—/18	4	2015	42	2,4/1,8
«Торф1»	Торфяная залежь	—/23,5	3,5	2014	48	2,6/2,2
«Торф2»	Торфяная залежь	—/23	4	2014	46	3,0/2,2
«Торф3»	Торфяная залежь	—/27	3	2014	49	2,9/2,7

\* Данные по двум противоположным радиусам.

статистической значимости  $P < 0,0001$ ). Корреляция между хронологиями деревьев носит иной характер: очень высокая положительная между «лес1» и «лес2» ( $R = 0,96$ ,  $P < 0,0001$ ), средняя положительная у пар «торф1»–«торф2», «торф1»–«торф3», «торф2»–«торф3» ( $R = 0,39-0,49$ ;  $P = 0,008-0,00065$ ) и слабая отрицательная между «лес2» и «торф1» ( $R = -0,31$ ;  $P = 0,05$ ). В других случаях значимых корреляций не обнаружено.

Изменчивость сумм осадков за гидрологический год, т.е. с октября предыдущего года по сентябрь текущего, по-видимому, для исследуемого района можно описать распределением с двумя максимумами (рис. 1) и с минимальным количеством осадков около 1950-х гг. Этот минимум прослеживается и в распределении сумм осадков условно «зимнего» периода с октября по апрель, когда вегетации растений не происходит (рис. 1, б).

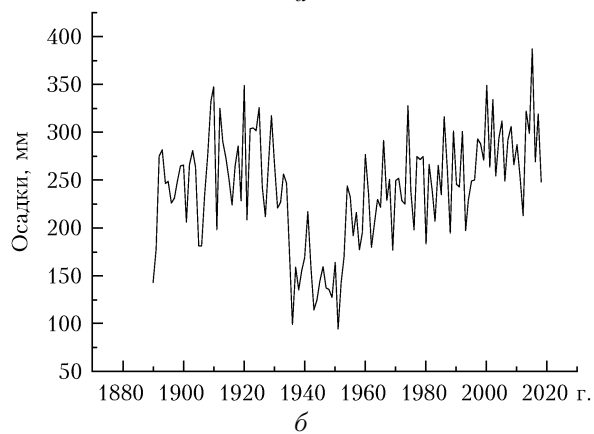
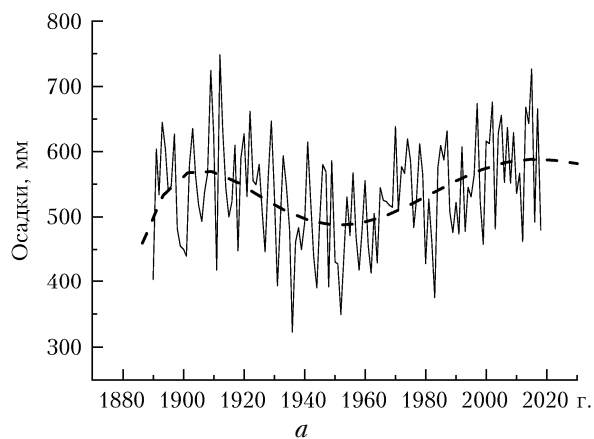


Рис. 1. Временной ход сумм атмосферных осадков за гидрологический год (а) и «зимний» период (б) (по данным ГМС Томск)

Проведенный Фурье-анализ изменчивости сумм осадков за гидрологический год и «зимний» период с 1890 по 2018 г. выявил наличие циклов, близких 2, 3, 4, 5, 6, 9 годам (рис. 2). Спектральный анализ осадков за более короткие временные интервалы показал, что интересующий нас здесь 4-летний цикл довольно устойчиво проявляется в летних осадках, однако в «зимних» он наблюдается нерегулярно.

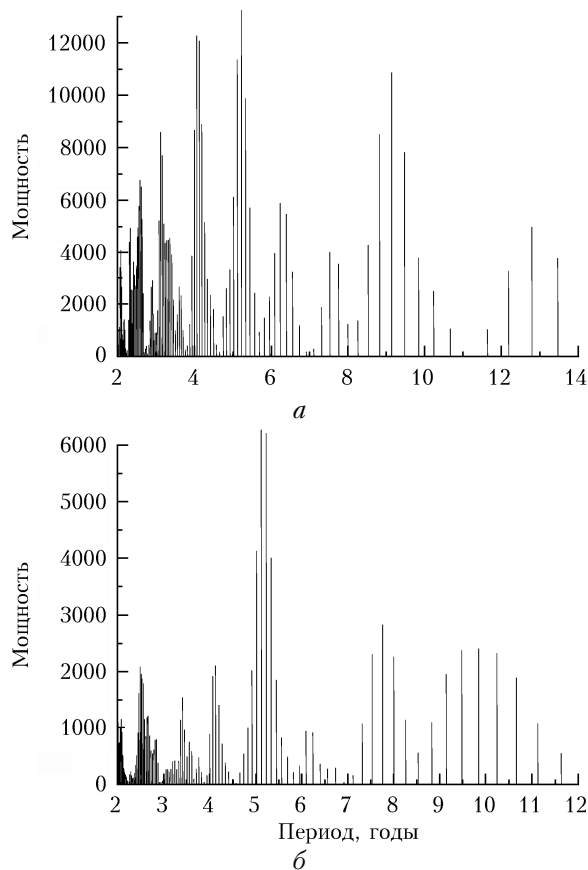


Рис. 2. Результаты Фурье-анализа сумм осадков гидрологического года (а) и «зимнего» периода (б)

Кросс-спектральный анализ летних и «зимних» осадков выявил наличие синхронности между их вариациями с циклом около 4 лет в 1968–2018 гг., однако связь вариаций недостаточно сильная (квадрат спектральной когерентности  $\sim 0,4$ ).

Экспериментальные значения распределения  $\text{CO}_2$  по кольцам спилов деревьев, росших близко на одном участке леса, оказались различными. Даже для спилов «лес1» и «лес2», имеющих высокую корреляцию хронологий ширины кольца, погодичные распределения  $\text{CO}_2$  различаются. Заметно, что распределение  $\text{CO}_2$  по кольцам и вариации ширины кольца ( $W$ ) часто находятся в противофазе (рис. 3, цв. вкладка). Чтобы охарактеризовать эту особенность, мы ввели искусственный параметр  $K$  — отношение величины сигнала от  $\text{CO}_2$  для данного кольца к ширине этого кольца:  $K = \text{сигнал } \text{CO}_2 / \text{ширина кольца}$  ( $K = \text{Signal } \text{CO}_2 / \text{Width}$ ). Этот параметр характеризует погодичную изменчивость сохранившегося от дыхания клеток  $\text{CO}_2$  в единице прироста. Была выполнена линейная аппроксимация полученных значений параметра  $K$  (статистическая значимость варьировалась как  $P = 0,05$ ;  $0,003$ ;  $0,001$  и  $< 0,0001$ ).

Анализ изменения параметра  $K$  (табл. 2) показал, что для исследуемого временного периода тренд  $K$  для деревьев сосен неодинаков: положительный, отрицательный и переменный.

Изменчивость хронологий параметра  $K$ 

Хронология	«Лес1»	«Лес2»	«Лес3»	«Торф1»	«Торф2»	«Торф3»
Тренд	Положительный	Отрицательный	Отрицательный	Положительный	Смена отрицательного на положительный (ок. 1990 г.)	Смена отрицательного на положительный (ок. 1985 г.)
$K$ , ppm/мм	50–70	133–87	167–53	37–163	137–30; 43–147	196–50; 83–143

Одновременно с измерениями вариации  $\text{CO}_2$  по кольцам проводились измерения давления в пробах газа, извлекаемых под вакуумом из древесины каждого годичного кольца. Как пример на рис. 4,  $a$

приведены вариации давления в газовых пробах колец спила «торф1», ошибка 10%. Датировка зафиксированных максимумов в вариациях давления в пробах свидетельствует о том, что поступления

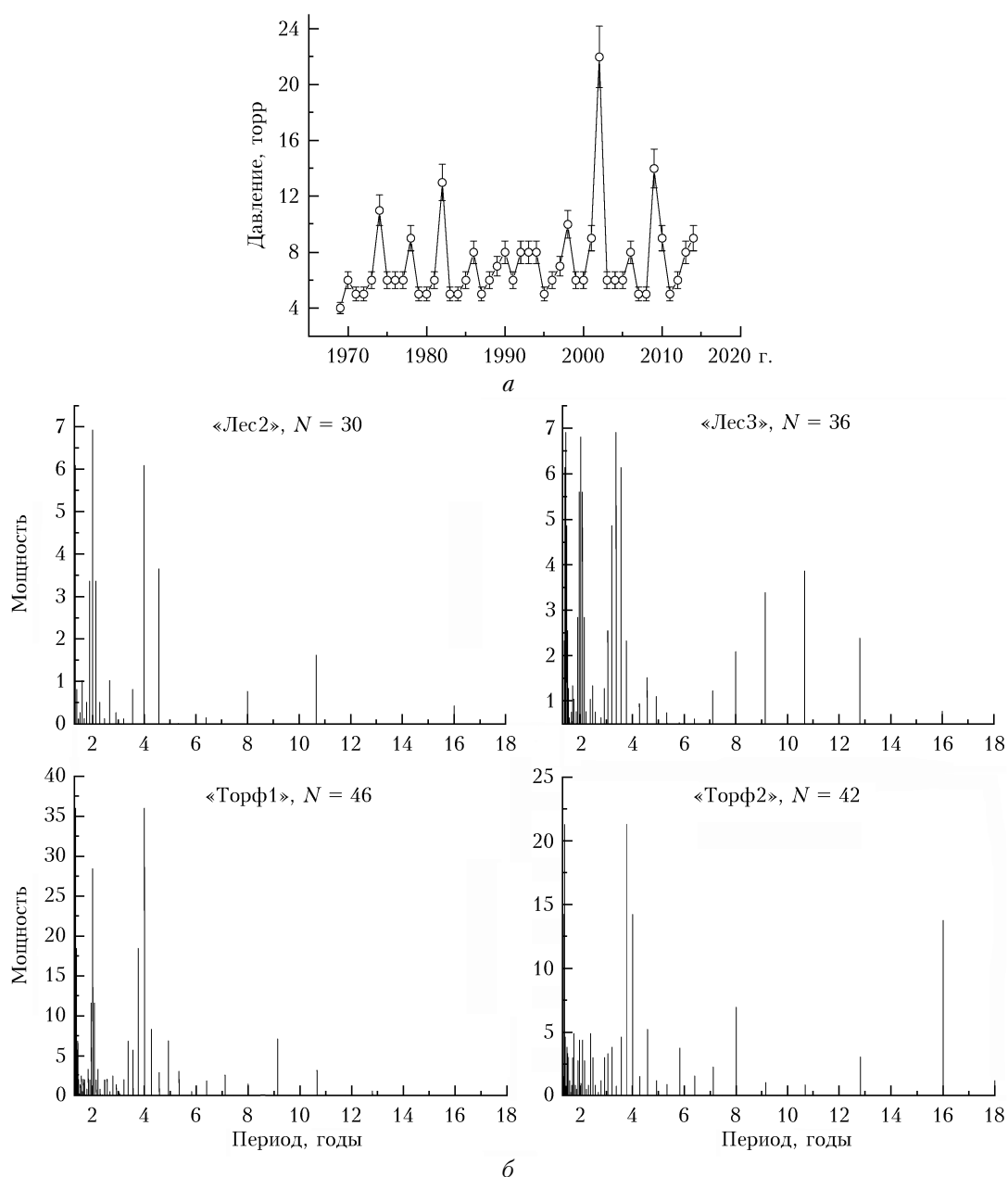


Рис. 4. Вариации давления в газовых пробах спила «торф1» ( $a$ ); результат Фурье-анализа вариации давления в пробах, извлекаемых из древесины колец спилов сосен ( $b$ ),  $N$  – количество проб

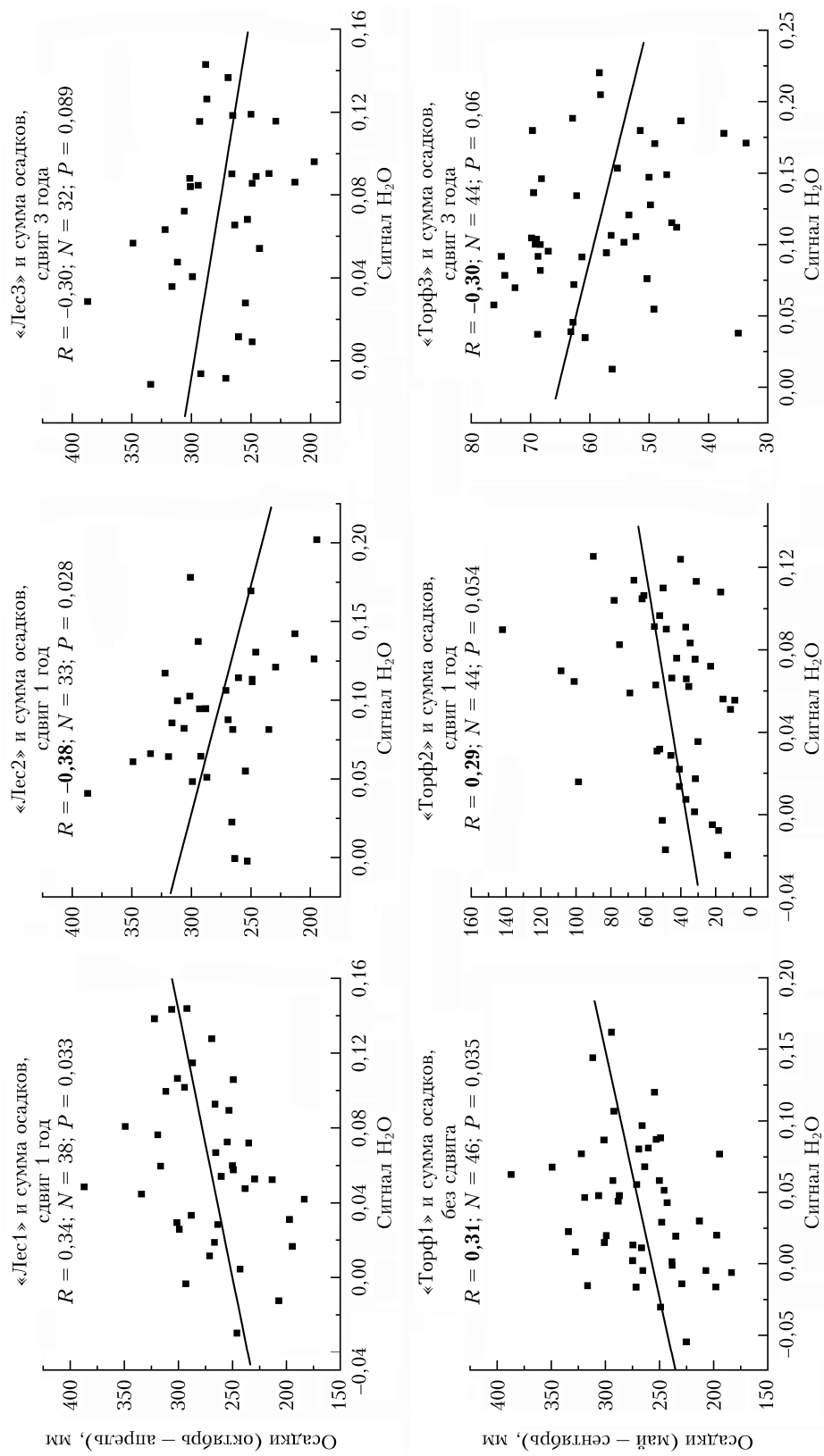


Рис. 5. Корреляция  $H_2O$  в годичных кольцах спилов с суммой осадков за октябрь – апрель и май – сентябрь. Полу жирным выделены достоверные значения коэффициента корреляции

CO<sub>2</sub> в атмосферу могли происходить у деревьев данной группы в следующие годы: «лес1» – 2015, 2011, 2007 гг.; «лес2» – 2011, 2008, 2004 гг.; «лес3» – 2015, 2010, 2008 гг.; «торф1» – 2013, 2008, 2006 гг.; «торф 3» – 2014, 2010, 2006 гг. Таким образом наблюдалась некоторая синхронность выделения CO<sub>2</sub> (т.е. дыхания стволов этой группы сосен). Результаты Фурье-анализа вариаций давления в пробах для некоторых спилов приведены на рис. 4, б (тренд предварительно удалялся). Результаты показали, что давление в извлекаемых пробах постепенно растет с возрастом дерева и в вариациях давления хорошо выражены циклы, близкие к 2 и 4 годам.

Если сохранившийся в древесных кольцах CO<sub>2</sub> представляет собой долю выдыхаемого клетками углекислого газа во время роста дерева, то регистрируемая H<sub>2</sub>O должна была быть связана только с осадками. Исходя из предположения, что древесина ствола в первую очередь смачивается талой водой, мы провели поиск линейной корреляции между построенными хронологиями H<sub>2</sub>O в кольцах спилов и суммами осадков за «зимний» период (октябрь–апрель). Однако явной линейной зависимости между этими величинами выявить не удалось. На рис. 5 приведены результаты найденной корреляции, которая в основном оказалась слабой (здесь же приведены данные единственной положительной корреляции H<sub>2</sub>O с осадками мая – сентября).

Однако анализ вариации H<sub>2</sub>O на 4-летнем масштабе в спилах позволил выявить ряд особенностей. Спектральный анализ полученных хронологий H<sub>2</sub>O спилов показал, что вариации с периодом, близким к 4 годам, присутствуют как в хронологиях спилов маркировки «лес», так и в хронологиях спилов маркировки «торф» (рис. 6).

Кросс-спектральный анализ хронологий H<sub>2</sub>O спилов показал следующее.

1. Четырехлетние вариации H<sub>2</sub>O в хронологиях «лес1» и «лес2» синхронны.

2. Четырехлетние вариации H<sub>2</sub>O спила «лес3» опережают на год четырехлетние вариации H<sub>2</sub>O в хронологиях спилов «лес1» и «лес2», которые, в свою очередь, опережают на год вариации H<sub>2</sub>O в хронологии спила «торф3».

3. Следовательно, 4-летние вариации H<sub>2</sub>O спилов «лес1» и «лес2», с одной стороны, и «торф3», с другой, могут быть противофазны, что подтвердилось результатами кросс-спектрального анализа, представленными на рис. 7. Пик взаимной спектральной плотности на 4-летнем периоде отчетливый, а спектральная когерентность очень высокая.

4. Четырехлетние вариации H<sub>2</sub>O в хронологиях «торф2» и «торф3» примерно синхронны с вариациями в хронологии «торф1», а связь между 4-летними вариациями H<sub>2</sub>O спилов «торф2» и «торф3» при наличии их синхронности достаточно сильная (квадрат когерентности ~1).

Кросс-спектральный анализ хронологий H<sub>2</sub>O и летних осадков показал, что 4-летние вариации H<sub>2</sub>O спилов «лес1» и «лес2» противофазны вариациям осадков, а 4-летние вариации H<sub>2</sub>O спила «лес3»

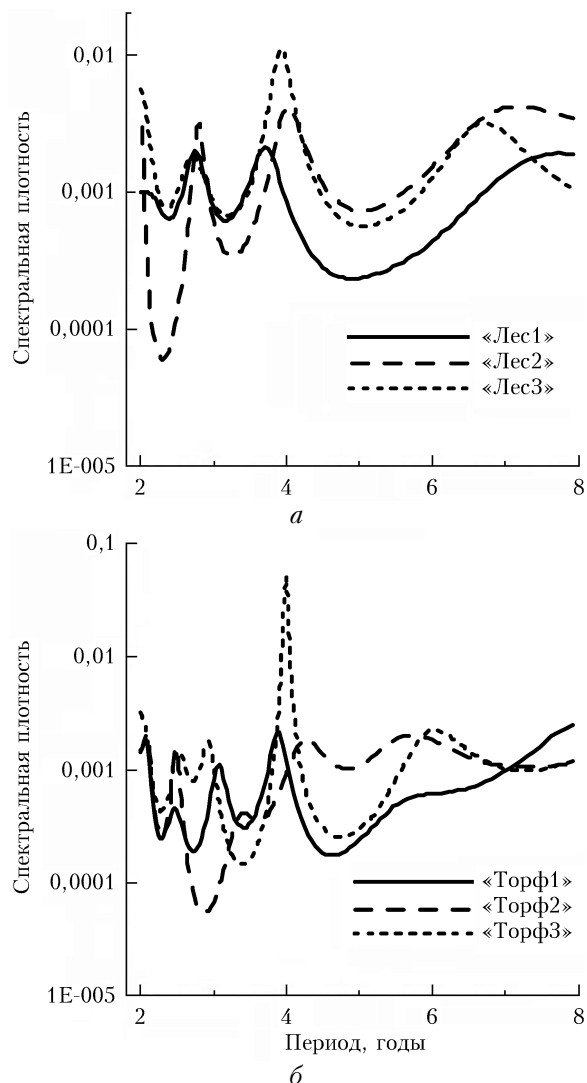


Рис. 6. Спектры хронологий H<sub>2</sub>O для спилов деревьев сосны: лес (а), торф (б)

запаздывают на год относительно вариаций летних осадков. Связь H<sub>2</sub>O с зимними осадками на 4-летнем масштабе не выявлена.

## Обсуждение результатов

Таким образом, оказывается, что произрастающие рядом деревья, которые принято характеризовать только хронологиями ширины колец, различаются вариацией сохранившихся газов в древесине колец спилов. Такая картина может свидетельствовать о различной реакции деревьев на колебания температуры, осадков и условий места произрастания. Исследованные спилы имели высокий коэффициент корреляции между радиусами одного спила, что свидетельствовало о благоприятности условий существования. В различия между спилами по радиальному приросту могло внести вклад влияние такого внешнего фактора, как почвенные условия (на гриве и в торфяной залежи). Если у группы деревьев «торф» эти условия довольно близки,

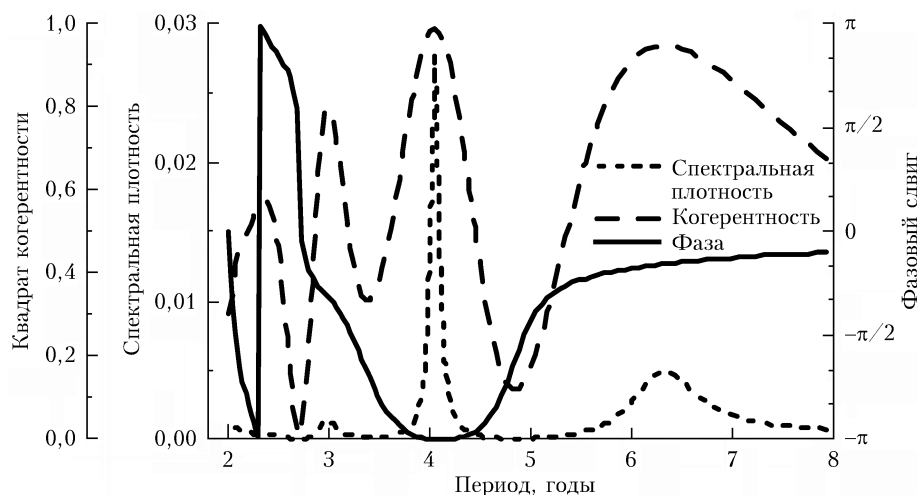


Рис. 7. Результаты кросс-спектрального анализа 4-летних вариаций  $H_2O$  спиллов «лес3» и «торф3»

то у деревьев маркировки «лес» они существенно различаются, о чем свидетельствует разброс величины коэффициента корреляции (от достоверно высокого между «лес1» и «лес2» до недостоверного у других деревьев этой группы, корреляция между приростами в группах «лес» и «торф» в основном оказалась незначимой). Это указывает, скорее всего, на почвенно-грунтовые различия между гривой и торфяной залежью, т.е. на способность почвы насыщаться атмосферной влагой и ее удерживать [11].

Как известно, для сосны особенно важны «зимние» осадки, так как от их количества зависят степень промерзания почвы и запас почвенной влаги, особенно необходимой в начальный период вегетации [16]. Однако если количество осадков в регионе заметно не меняется, как показали результаты (см. рис. 1), то скорость изменения температур воздуха и почвы региона может сказаться на режиме увлажнения почвы, а изменение скорости роста температур [5, 17], видимо, нарушает существовавшее ранее многолетнее равновесие осадки / температура для дерева.

Кроме того, если предполагать спад количества осадков в будущем (см. рис. 1), то дальнейший рост температуры может привести к еще большему нарушению этого баланса, которое может сказаться на хвойных лесах региона. Такое изменение внешних условий может уменьшить поступление в атмосферу  $CO_2$ , циклически выделяемого стволами и корнями хвойных деревьев.

### Заключение

Проведенный анализ ряда характеристик древесины спиллов деревьев, произраставших близко друг к другу на одной территории, показал следующее.

1. Для корректной оценки выделения в атмосферу  $CO_2$  стволами разных деревьев необходимо учитывать циклический ритм диффузного поступления  $CO_2$  из стволов, для чего нужны длительные по времени измерения.

2. Сходные хронологии ширины колец разных деревьев могут характеризоваться несхожими хронологиями  $CO_2$  в кольцах, поэтому исследование хронологий ширины колец не может дать полного представления о влиянии внешних условий на произрастание дерева, только анализ совместного поведения хронологий ширины и газовых составляющих может расширить понимание сложных процессов, связанных с ростом дерева.

3. Значимой корреляции сохранившейся  $H_2O$  в кольцах спиллов с осадками не обнаружено, т.е. осадки не оказывают значительного влияния на связанную воду, которая сохраняется в древесине и извлекается из древесины колец только вакуумным методом. Кросс-спектральный анализ хронологий  $H_2O$  и осадков на 4-летнем масштабе показал отсутствие связи с зимними осадками и противофазность с летними для ряда спиллов.

4. Общим для всех исследуемых спиллов явилась цикличность во всех полученных хронологиях.

5. Увеличивающаяся в последнее время скорость роста температуры при отсутствии такого же роста осадков в регионе может нарушить существовавшее ранее многолетнее равновесие осадки / температура, что может отрицательно сказаться на жизненных процессах дерева, так как, хотя лесные сообщества являются саморегулирующимися системами и обладают большой устойчивостью к изменяющимся внешним условиям, резкие изменения климата могут привести к необратимым последствиям.

Работа выполнена в рамках Проекта IX.138.1.1 Программы фундаментальных исследований государственных академий наук.

1. Тишин Д.В. Дендроклиматические исследования ели финской (*Picea x fennica* (Regel) Kom.) на южной границе ареала // Уч. зап. Казан. гос. ун-та. 2008. Т. 150, кн. 4. С. 219–225.
2. Ваганов Е.А., Шиатов С.Г., Мазена В.С. Дендроклиматические исследования в Урало-Сибирской Субарктике. Новосибирск: Наука, 1996. 246 с.
3. Шишов В.В., Ваганов Е.А., Хьюс М.К., Корец М.А. Пространственная изменчивость радиального прироста

- деревьев на территории Сибири в последнем столетии // Докл. РАН. 2002. Т. 387, № 5. С. 690–693.
4. *Esper J., Cook E.R., Schweingruber F.H.* Low-frequency signals in long tree-ring chronologies for reconstructing past temperature variability // *Science*. 2002. V. 295. P. 2250–2253.
  5. *Седьмое* национальное сообщение Российской Федерации, представленное в соответствии со статьями 4 и 12 Рамочной Конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата и статьей 7 Киотского протокола. М., 2017. 348 с. [Электронный ресурс]. URL: [https://unfccc.int/files/national\\_reports/annex\\_i\\_nation/application/pdf/20394615\\_russian\\_federation-nc7-1-7nc.pdf](https://unfccc.int/files/national_reports/annex_i_nation/application/pdf/20394615_russian_federation-nc7-1-7nc.pdf) (last access: 26.10.2018).
  6. *Timoshok E.E., Timoshok E.N., Nikolaeva S.A., Savchuk D.A., Filimonova E.O., Skorokhodov S.N., Bocharov A.Yu.* Monitoring of high altitudinal terrestrial ecosystems in the Altai Mountains // *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 2016. V. 48. P. 1–9.
  7. *Герногаева Г.М., Кухта А.Е.* Отклик бореальных древостоев на современные изменения климата на севере европейской части России // *Метеорол. и гидрол.* 2018. № 6. С. 111–120.
  8. *Tošić I., Unkašević M.* Analysis of precipitation series for Belgrade // *Theor. Appl. Climatol.* 2005. V. 80. P. 67–77.
  9. *Соломина О.Н., Аптикаева О.И., Шаталин А.Ю.* Ритмы природных процессов по результатам вейвлет-анализа годовых колец деревьев на севере европейской части России за последние 300 лет // *Геофиз. процессы и биосфера*. 2009. Т. 8, № 1. С. 51–62.
  10. *Ageev B.G., Gruzdev A.N., Sapozhnikova V.A.* Cyclic variation of residual (CO<sub>2</sub> + H<sub>2</sub>O) and total pressure in conifer stem and woody root tree rings // *J. Sib. Fed. Univ. Biology*. 2018. V. 11, N 3. P. 206–217.
  11. *Тишин Д.В.* Влияние природно-климатических факторов на радиальный прирост основных видов деревьев Среднего Поволжья: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Казань: Ин-т экол. природ. систем АН РТ, 2006. 20 с. [Электронный ресурс]. URL: [https://dspace.kpfu.ru/xmlui/bitstream/handle/net/38458/170406\\_5.pdf](https://dspace.kpfu.ru/xmlui/bitstream/handle/net/38458/170406_5.pdf) (last access: 26.10.2018).
  12. *Sapozhnikova V.A., Gruzdev A.N., Ageev B.G., Ponomarev Yu.N., Savchuk D.A.* Relationship between CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O variations in tree rings of Siberian stone pine and meteorological parameters // *Dokl. Earth Sci.* 2013. V. 450, Part 2. P. 652–657.
  13. *Ageev B., Ponomarev Yu., Sapozhnikova V., Savchuk D.* A laser photoacoustic analysis of residual CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O in larch stems // *Biosensors*. 2015. V. 5. P. 1–12.
  14. *Ageev B.G., Gruzdev A.N., Sapozhnikova V.A.* Variations in gas components and total pressure in stem and root disc wood of conifer species // *Atmos. Ocean. Opt.* 2017. V. 30, N 2. P. 209–215.
  15. *Паневин В.С.* Леса и лесное хозяйство Томской области. Томск: Изд-во Том. ун-та, 2006. 126 с.
  16. *Николаева С.А., Савчук Д.А.* Климатогенная реакция деревьев сосны на юге Томской области // *Журн. Сиб. федерал. ун-та. Биол.* 2008. Т. 1, № 4. С. 400–413.
  17. *GISS Surface Temperature Analysis (GISTEMP0 – NASA GISS DATA.* URL: <https://data.giss.nasa.gov/gistemp/> (last access: 26.10.2018).

*B.G. Ageev, V.A. Sapozhnikova, A.N. Gruzdev, E.A. Golovatskaya, E.A. Dukarev, D.A. Savchuk.*

**Comparison of residual gas characteristics in the tree rings of Scots pine trees.**

The work compares the chronologies of H<sub>2</sub>O and CO<sub>2</sub> and pressure in the vacuum-extracted tree-ring disc gas samples of six Scots pine trees from one growth region. The results are analyzed. The analysis shows that discs have different annual CO<sub>2</sub> distributions, the H<sub>2</sub>O data weakly correlate with precipitation, but the detected cyclicity is common to all the chronologies analyzed.



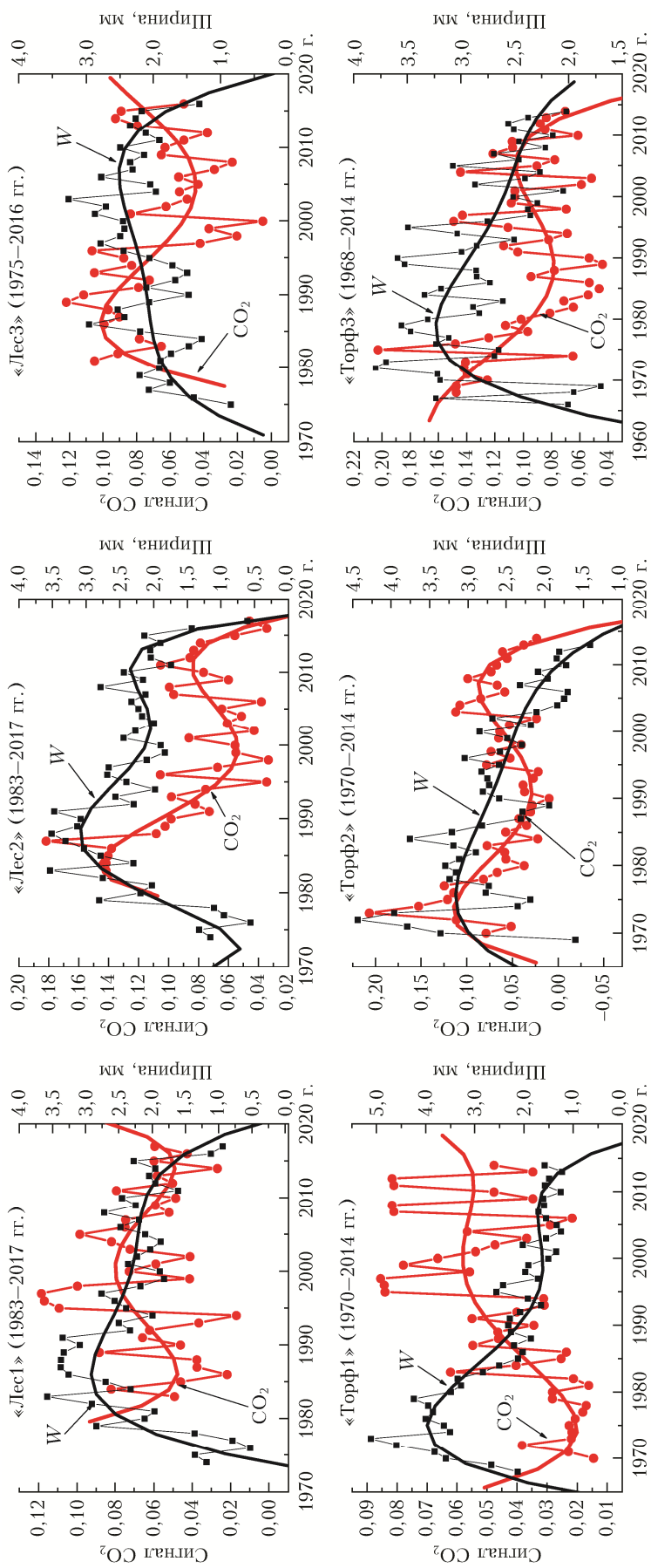


Рис. 3. Сравнение экспериментальных хронологий CO<sub>2</sub> по колцам (красная кривая) и ширины годичных колец (черная кривая) сплюгов сосен. Данные аппроксимированы полиномом 4-го порядка