

РАДИАЦИЯ И БИОСФЕРА

УДК 581.5+581.134.5:581.824+582.475+551.510.534

Вариации радиального прироста и газовых компонентов древесины лиственниц, пораженных пожаром 1908 г.

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, Академический пр., 10/3

Поступила в редакцию 25.04.2022 г.;
после доработки 4.05.2022 г.;
принята к печати 15.07.2022 г.

Динамика содержания CO_2 в древесине годичных колец и радиальный прирост деревьев могут меняться при воздействии низовых пожаров. Исследование спилов лиственниц, переживших пожар 1908 г. при взрыве космического тела в районе Подкаменной Тунгуски, выявило ряд особенностей поведения сорбированных CO_2 , ($\text{CO}_2+\text{H}_2\text{O}$) в древесине лиственниц. Анализ вакуумно-десорбированных проб из древесины годичных колец, проведенный оптико-акустическим методом, показал длительное погодичное накопление CO_2 и ($\text{CO}_2+\text{H}_2\text{O}$) в стволах после 1908 г. Обнаружена смена цикличности выделения CO_2 в посткатастрофный период. В хронологиях ширины колец спилов также отмечена смена цикличности вариаций. Как показал анализ коэффициентов корреляций, специфическое поведение хронологий ширины колец спилов лиственниц этого региона, вероятнее всего, связано с вариациями солнечной активности.

Ключевые слова: спилы лиственниц, пожарное поражение, ширина годичных колец, тунгусское космическое тело, CO_2 , ($\text{CO}_2+\text{H}_2\text{O}$), солнечная активность; larch disc, fire injury, tree ring width, Tunguska space body, CO_2 , ($\text{CO}_2+\text{H}_2\text{O}$), solar activity.

Введение

В настоящее время пристальное внимание уделяется всем источникам парникового газа CO_2 , выбрасываемого в атмосферу. Оцениваются поступления CO_2 и от пожаров, количество которых в России неуклонно растет. По официальным данным, в России ежегодно регистрируется от 10 до 33 тыс. лесных пожаров; 36,6% площадей (из 8,9 млн га площадей природных пожаров) приходится на низовые пожары. Объем выбросов от пожаров в среднем составляет 230 млн т CO_2 в год, и почти 50% выбросов приходится на низовые пожары [1].

Исследования содержания сохранившегося CO_2 в пораженных пожаром деревьях показывают, что низовой пожар может стимулировать накопление CO_2 в стволах еще долгие годы [2]. Этот результат заставляет предполагать, что пораженные пожаром деревья могут поставлять в атмосферу дополнительное количество CO_2 , диффузно выделяемого стволами в постпожарный период. В допожарный период, по оценкам разных авторов, 5–25% связан-

ного углерода в виде CO_2 повторно выбрасывается в атмосферу древесными стволами и ветвями при дыхании, при этом физиология древесных стволов и ветвей до сих пор остается малоизученной [3].

В 1908 г. в районе р. Подкаменной Тунгуски произошел взрыв космического тела (ТКТ – Тунгусское космическое тело), в результате которого был повален лес на площади $2150 \pm 25 \text{ км}^2$, а возникший низовой пожар повредил растительность на площади более 100 км^2 [4]. Выжившие после катастрофы молодые лиственницы сохранили следы поражения пожаром. Древесная растительность сохраняет информацию о природных катаклизмах прошлого достаточно длительное время [5], поэтому район Тунгусской катастрофы превратился в уникальный научный полигон [6].

Цель настоящей работы – исследовать хронологию содержания остаточных газов и вариации ширины годичных колец деревьев, произрастающих в зоне взрыва ТКТ, в до- и посткатастрофный периоды.

Природа ТКТ в этой статье не обсуждается. К настоящему времени имеется более ста вариантов объяснения этого явления, интересная интерпретация события предложена в [7]. Хотя в районе взрыва ТКТ не найдено сколько-нибудь значительного

* 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).

Основные характеристики спилов лиственниц

Маркировка	Размеры, мм	Толщина, мм	Количество колец
U	185 × 150	22	169
D1	190 × 140	30	156
D2	175 × 150	26	162
D3	220 × 210	23	169
D4	180 × 95	27	83
D5	190 × 85	36	97
D6	130 × 100	30	115

количества метеоритного вещества, которое можно было бы уверенно отождествить с веществом ТКГ, внимание человечества к этому событию не ослабевает.

Материалы и методы

Исследования проводились на основе спилов, предоставленных участниками Комплексной самостоятельной экспедиции (КСЭ, Новосибирск, Томск) В.Д. Яшковым (спил маркировки **U**) и И.К. Дорошиным (спилов маркировки **D**). В 1981–1991 гг. экспедицией по программе «Лес» осуществлялся поиск деревьев, пораженных низовым пожаром, но выживших после катастрофы 1908 г. Необычность низового пожара отмечалась еще первыми исследователями этого района. Так, Л.А. Кулик отметил, что в местах, где есть сильный вывал леса, «торфяной покров и лесная подстилка, т.е. горячие элементы почвы, почти нацело отсутствуют» [8, с. 16], поэтому низовой пожар не мог активно распространяться. Поваленные взрывом деревья нарушили непрерывность мохового покрова и подстилки так, что не было сплошного слоя проводников горения. Обычно низовой пожар повреждает кору и камбий на стволах деревьев с образованием пожарных подсушин. Именно с таких деревьев брались образцы (спилов) [9, 10]. Исследования в настоящей работе проводились на спилах деревьев (рис. 1, табл. 1) лиственницы Гмелина (*Larix gmelinii* (Rupr.) Kuzen.). Заметим, что эти деревья, судя по количеству и ширине их годовичных колец в докатастрофный период на взятых спилах, во время пожара 1908 г. были относительно молодыми, небольшими по высоте и диаметру, угнетенными под пологом древостоя и с тонкой корой. С одной стороны, они подверглись воздействию пожара, а с другой – относительная гибкость стволов позволила им устоять против ударной волны.

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

Методика исследований вариаций содержания газовых компонент в древесине колец уже неоднократно описывалась ранее (например, в [11]). Был применен метод вакуумной десорбции сохранившихся в древесине газов. Оптико-акустический спектрометр с перестраиваемым по частоте CO₂-лазером позволяет регистрировать концентрации (парциальное давление) извлеченных газов на трех линиях генерации лазера, совпадающих с линиями поглощения CO₂. При использовании четвертой линии генерации, совпадающей с линиями поглощения CO₂ и H₂O, можно исследовать вариации H₂O в древесине колец. Полученные оптико-акустические сигналы на линиях генерации лазера с точностью до калибровочного множителя пропорциональны концентрации исследуемого газа.

Некоторые годовичные кольца спилов деревьев в районе катастрофы были очень узкими, так что древесину соседних колец было трудно разделить. Чтобы оценить вариацию CO₂ в таких случаях, мы решили использовать следующую методику: изготавливалась навеска из древесины нескольких неразделимых узких колец, приблизительно равная по весу навеске из древесины одного широкого кольца. В этом случае измеренный сигнал от CO₂ характеризовался как сигнал от CO₂ суммы колец и каждому кольцу приписывалось среднее значение содержания CO₂.

Для выявления цикличностей в полученных результатах применялись спектральный

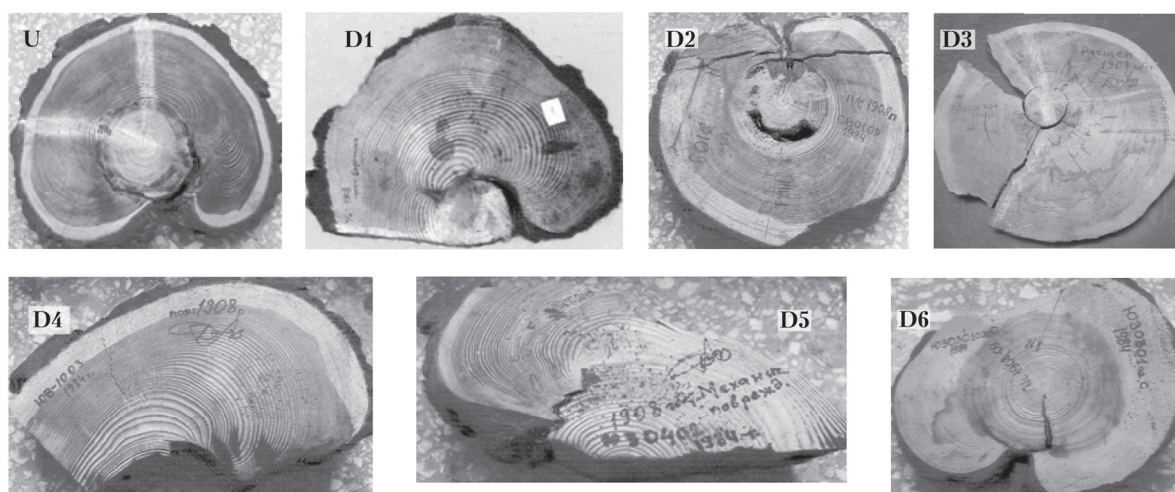


Рис. 1. Внешний вид спилов лиственниц, переживших катастрофу 1908 г.

и кросс-спектральный анализ высокого разрешения по методу максимальной энтропии. Предварительно из результатов измерений исключались долговременные тренды.

Результаты

1. Погодичное распределение содержания CO_2 в древесине годичных колец

Для определения вариаций CO_2 в древесине колец были выбраны спиловы **U**, **D1**, **D2**, **D3** и **D6**. Используемая методика исследования содержания CO_2 в десорбированных пробах газа позволила обнаружить увеличение содержания CO_2 в спилах в посткатастрофный период (рис. 2).

Рис. 2, *a, б* иллюстрирует погодичное распределение CO_2 и ($\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$) в древесине колец спилов **U** и **D1**. Отчетливо видно, что повышенное содержание CO_2 сохраняется в древесине колец приблизительно 30 лет. Распределения CO_2 , десорбированного суммой узких неразделимых колец, представлены на рис. 2, *в-д*. Здесь сигнал от CO_2 нормирован на число колец N и вес навески. Во всех случаях, кроме **D6**, видно увеличение сигнала в районе 1908 г. В спиле **D6**, по нашим оценкам, максимум выделения десорбированного CO_2 смещен к 1940 г. Такое распределение, скорее всего, связано с условиями произрастания дерева.

2. Характер цикличности в распределениях CO_2 и вариациях ширины колец спилов в посткатастрофный период

Вясним, меняется ли цикличность хронологий CO_2 и ширины колец после катастрофы 1908 г. Ранее мы обнаружили, что для хвойных деревьев

характерна четырехлетняя цикличность как в распределениях содержания CO_2 в годичных кольцах, так и в хронологиях ширины (например, [12]). В настоящей работе выявление цикличности в хронологиях CO_2 и ширинах колец было проведено для двух спилов **U** и **D1**, имеющих достаточно длинные до- и посткатастрофные хронологии. Было найдено, что коэффициенты корреляции между погодичными вариациями ширины кольца и CO_2 для этих спилов за 1909–1943 гг. оказались статистически значимыми: $R = 0,49$ ($N = 39$; $P = 0,001$) для спила **U** и $R = -0,41$ ($N = 35$; $P = 0,01$) для спила **D1**. Поэтому мы предположили, что для хронологий CO_2 и ширины колец можно ожидать появления аналогичных циклов. Анализ спектров хронологий содержания CO_2 в древесине спилов **U** и **D1** после 1908 г. показал, что в спектрах присутствуют трехлетние максимумы (рис. 3). Дополнительно для спила **D1** был проведен кросс-спектральный анализ высокого разрешения хронологий CO_2 и ширины годичных колец за 1911–1934 гг. Оказалось, что трехлетние вариации ширины колец запаздывают относительно трехлетних вариаций CO_2 примерно на четверть периода ($\pi/2$) (рис. 4, цв. вкладка). Это означает, что максимумы вариаций содержания CO_2 в среднем соответствуют ускоренному приросту ширины колец.

Как наглядную иллюстрацию смены картины циклов после события 1908 г. приведем спектры хронологий ширин колец спилов **D1** и **D2** (рис. 5, цв. вкладка) в докатастрофный и посткатастрофный периоды. В докатастрофный период в обоих спектрах проявились вариации ширины колец с циклом ~ 4 года. В посткатастрофный период такие вариации отсутствуют, но проявились вариации с двух- и трехлетними циклами. Изменение длины цикла в хронологиях ширины колец указывает на стресс-

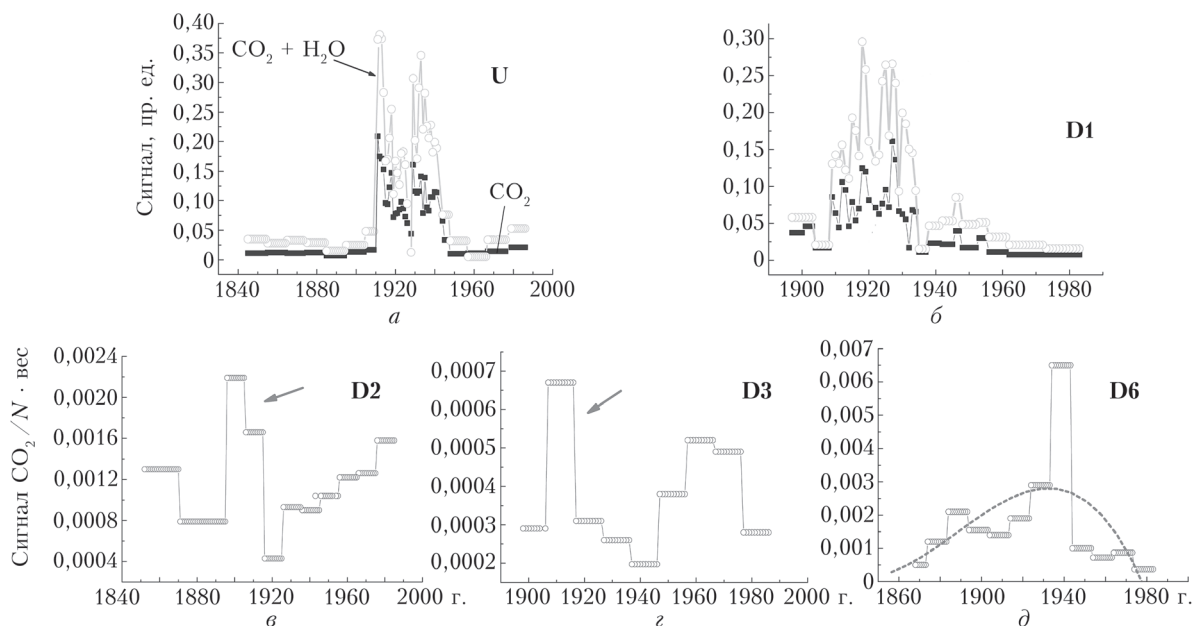


Рис. 2. Погодичные вариации десорбированных газов в спилах с широкими (*a, б*) и узкими (*в, з, д*) кольцами (стрелка указывает на район 1908 г., пунктиром обозначено смещение максимума распределения CO_2 в **D6**)

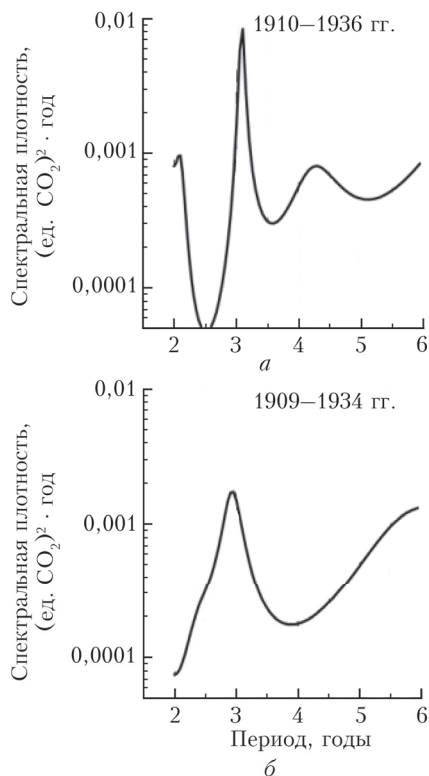


Рис. 3. Трехлетний цикл в хронологиях CO_2 в спилах **U** (а) и **D1** (б) в посткатастрофный период

совую ситуацию, приведшую к резкому изменению характера межгодовых вариаций ширины колец. Анализ изменения цикличности дает возможность понять, в какие именно периоды роста дерева происходила смена цикла.

3. Корреляция между шириной колец спилов деревьев района катастрофы и солнечной активностью

Анализ хронологий ширины годичных колец спилов показывает, что все спилы, кроме **D6**, имеют общую особенность: у всех имеется увеличение прироста после 1908 г. (рис. 6). Этот эффект был отмечен ранее [13]. Особенность поведения **D6** обусловлена, видимо, увеличением затопления, так как в этих зонах «идет соревнование лесообразовательного и болотообразовательного процессов» [14, с. 314].

Кроме того, к особенностям спила **D6** следует отнести следующие: 1) ширина кольца 1908 г. оказалась больше ширины соседних колец; 2) погодичные вариации ширины и содержания CO_2 находятся в противофазе: с увеличением ширины кольца уменьшается содержание в нем CO_2 и наоборот.

Обращают на себя внимание несколько других особенностей: 1) у спилов **D1**, **D2**, **D3** и **U** в районе 1825 г. также наблюдается увеличение ширины кольца; 2) увеличение ширины кольца в районе 1908 г. начинается раньше 1908 г. Последнее особенно

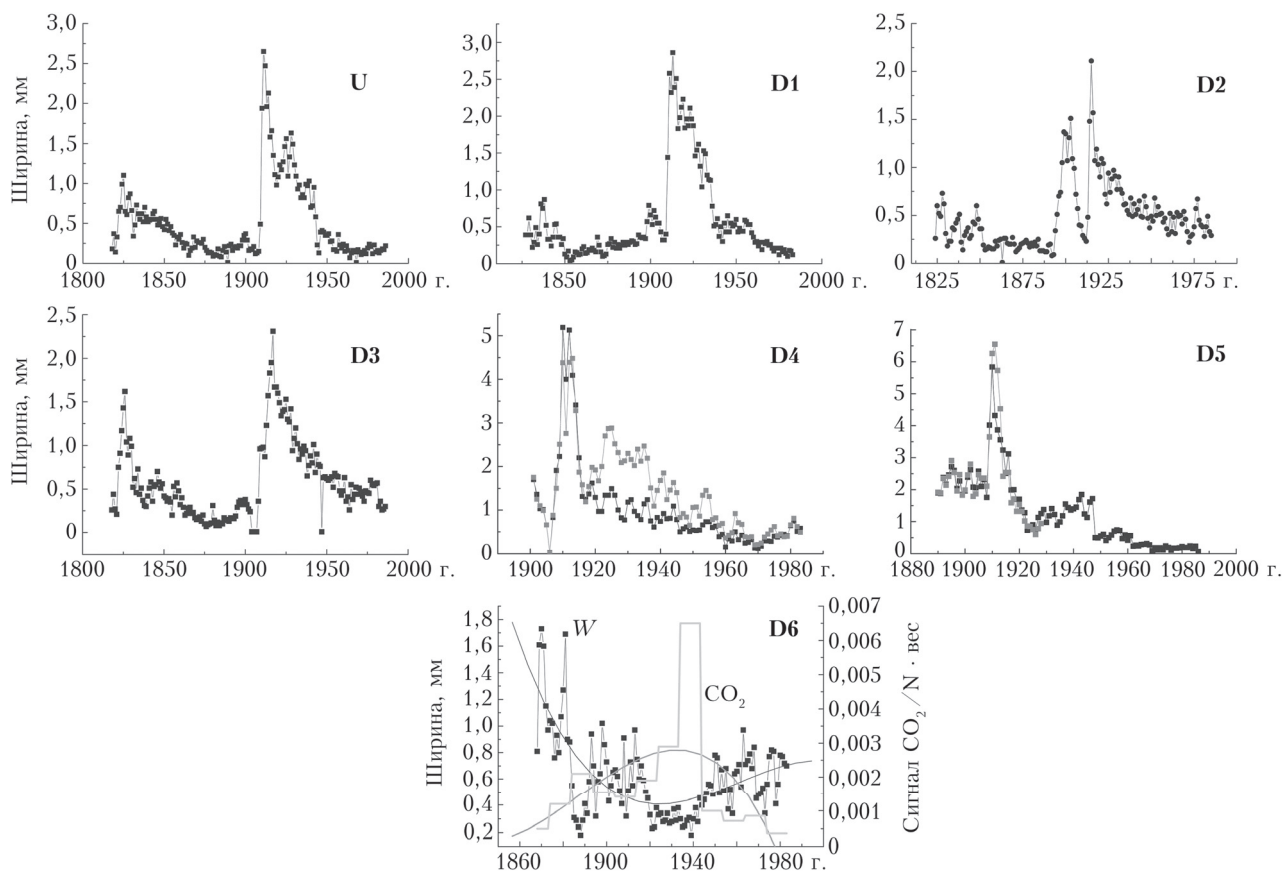


Рис. 6. Вариации ширины (W) колец спилов в районе катастрофы. Для спилов **D4** и **D5** ширины измерялись по двум направлениям (двум радиусам). Аппроксимация полиномами хронологий ширины и CO_2 для **D6** показывает, что они противофазны

заметно в спиле **D2**, ширина колец которого имеет два ярко выраженных максимума: первый – до и второй – после катастрофы 1908 г. Отметим, что хронологии спилов **U**, **D1** и **D3** также имеют два максимума в районе 1908 г., при этом первые максимумы по величине значительно меньше вторых. Рост ширины колец до 1908 г. можно было бы связать с солнечной активностью [15]. На эту роль подходят два солнечных цикла (№ 14 и 15) с максимумами в 1906 и 1917 гг. [16]. В таком случае влияние солнечных циклов могло бы маскировать реакцию дерева на пожар 1908 г. Был проведен поиск связи с вариацией солнечной активности.

Фурье-анализ хронологий ширин (FFT, пакет программ ORIGIN) показал, что в хронологиях всех спилов можно найти цикл, близкий 11-летнему солнечному циклу (рис. 7).

Была проведена оценка коэффициентов корреляции между шириной годовых колец спилов и числом солнечных пятен с использованием данных сайта [17]. Коэффициенты корреляции определялись за время каждого солнечного цикла (№ 8–21). Получилась детальная картина корреляции ширин годовых колец с количеством пятен на Солнце за период роста дерева. Значимая корреляция оказалась в 60% случаев (иногда при сдвиге рядов на 2–3 г.).

В предположении, что солнечная активность больше всего должна была сказываться на молодых

деревьях, были проанализированы данные для деревьев в возрасте ~ 30 лет (табл. 2). Корреляция между вариациями показателя солнечной активности и шириной колец молодых деревьев оказалась статистически значимой (разные знаки корреляции свидетельствуют о разных условиях произрастания деревьев).

Таблица 2

Коэффициенты корреляции хронологий ширины колец спилов с солнечной активностью

Спил	Годы	<i>R</i>	<i>N</i>	<i>P</i>	Сдвиг
U	1820–1850	-0,42	30	0,03	3
D1	1827–1857	+0,46	31	0,008	0
D2	1824–1854	+0,36	31	0,04	0
D3	1878–1907	-0,35	30	0,05	0
D4	1901–1931	-0,49	31	0,005	0
D5	1820–1890	-0,33	31	0,07	0
D6	1868–1898	+0,53	31	0,002	0

Чтобы найти возможную связь с вариацией солнечной активности, мы оцифровали данные для этого же региона по древесно-кольцевой хронологии сосны из [18]. На рис. 8 приведен график зависимости ширины колец от числа солнечных пятен, $R = -0,38$; $N = 48$; $P = 0,008$. Корреляция оказалась значимой для 1794–1838 гг., когда дереву было ~ 50 лет, в более ранний период корреляция была незначимой.

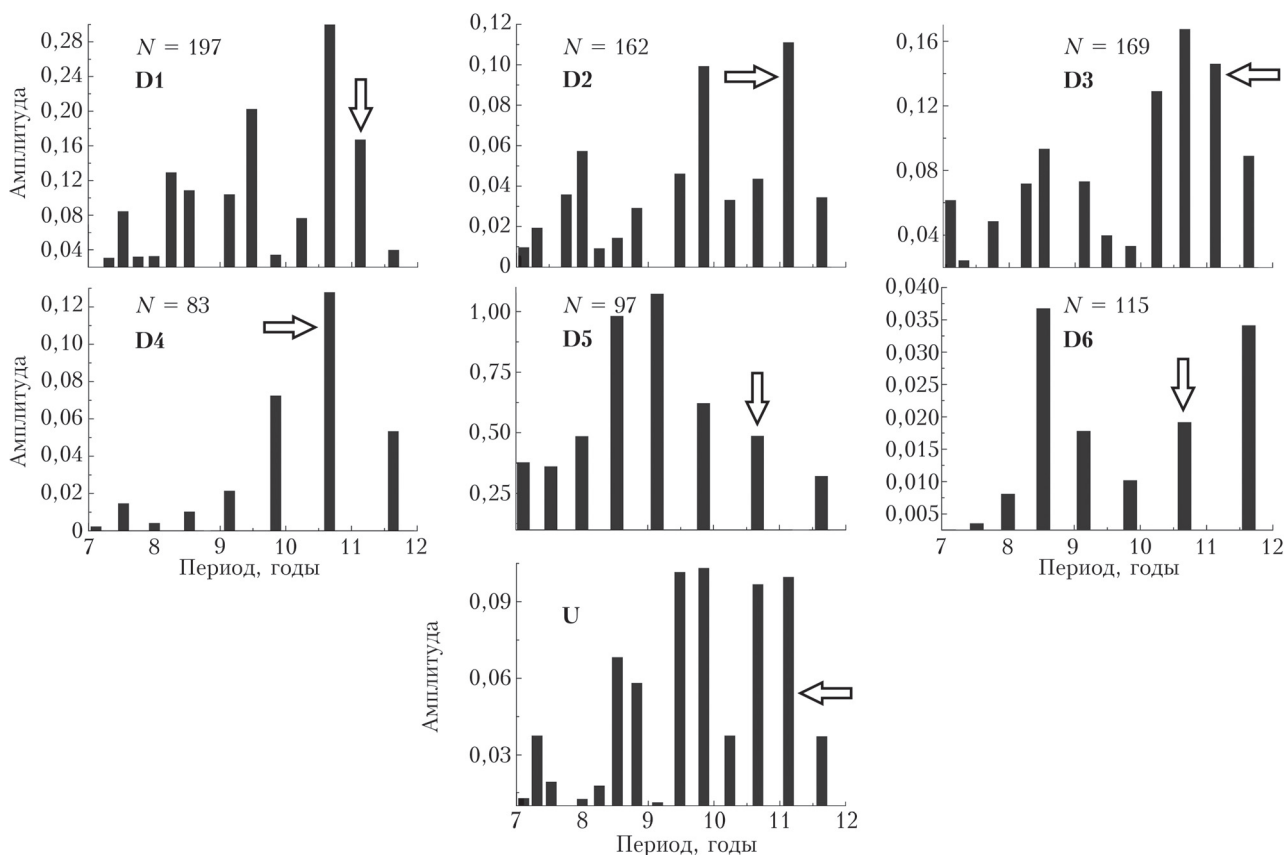


Рис. 7. Результат Фурье-анализа хронологий ширин спилов (длина рядов $N = 83$ –169)

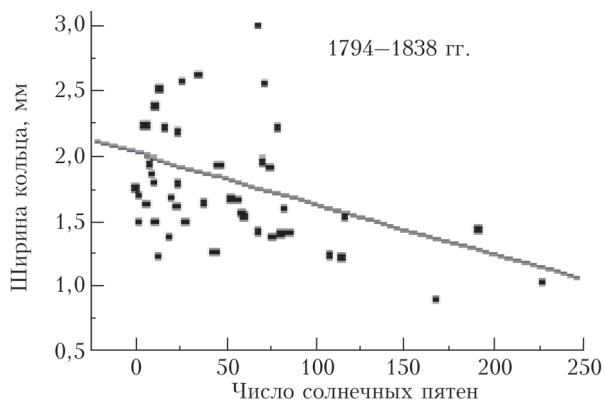


Рис. 8. Корреляция между числом солнечных пятен и шириной колец сосны по данным [18]

Таким образом, можно считать, что на радиальный прирост молодых деревьев района Подкаменной Тунгуски, вероятнее всего, влияют вариации солнечной активности, что сказывается на появлении дополнительных максимумов в погодичном распределении ширины колец.

Заключение

Исследования поведения газов, десорбированных из древесины колец, и анализ древесно-кольцевых хронологий спилов в районе катастрофы ТКТ 1908 г. показали:

1) событие 1908 г. в районе Подкаменной Тунгуски спровоцировало у большинства переживших катастрофу деревьев накопление CO_2 (и H_2O) в древесине стволов;

2) длительность сохранения повышенного содержания CO_2 (и H_2O) в древесине стволов можно приблизительно оценить в 30 лет. Есть вероятность того, что в этот период в атмосферу из стволов диффузно поступало дополнительное количество CO_2 ;

3) накопление CO_2 (и H_2O), как показывают исследования, происходило одновременно с ростом ширины кольца;

4) анализ хронологий CO_2 и ширин колец показал, что катастрофа 1908 г. вызвала смену четырехлетней цикличности на трехлетнюю в посткатастрофный период. Момент смены циклического поведения содержания CO_2 и ширины колец может указывать на появление стрессовой ситуации в регионе;

5) у деревьев, растущих в районе катастрофы, в начальный период жизни наблюдается значимая корреляция ширин колец с солнечной активностью (11-летним циклом). Можно предположить, что и вариации CO_2 будут также зависеть от вариаций солнечной активности.

Исследования позволили выявить ряд особенностей изменения ширины колец и содержания CO_2 в древесине в посткатастрофный период. Работа расширяет список экспериментальных материалов по району катастрофы и может представлять интерес для специалистов, занимающихся проблемами атмосферно-биосферного обмена в экологически неблагоприятных районах.

Финансирование. Работа выполнена в рамках госбюджетных проектов ИОА СО РАН (FWRU-2021-0009, 121031500340-6) и ИМКЭС СО РАН (FWRG-2021-0003, 121031300226-5).

Список литературы

1. Korotkov V.N. Greenhouse gases and black carbon emissions from wildfires in Russia. Forest ecosystems of boreal zone: biodiversity, bioeconomy, ecological risks // Proc. All-Russian Conf. Internat. Participation. Krasnoyarsk: IF SB RAS, 2019. P. 196–197.
2. Ageev B.G., Sapozhnikova V.A., Savchuk D.A. Characteristics of some discs of the trees from the site of explosion of the Tunguska bolide // Proc. SPIE. N 11916. 2021. P. 1191638-1–6. DOI: 10.1117/12.2603048.
3. Bowman W.P. Respiratory ecophysiology of woody stems and branches in temperate forest trees // Submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy in the Graduate School of Arts and Sciences Columbia University. 2005. URL: https://blackrockforest.org/wp-content/uploads/2021/03/res_pub_bowman_dissertation_nov_2.pdf (last access: 21.02.2022).
4. Vasilyev N.V. The Tunguska Meteorite problem today // Planet. Space Sci. 1998. V. 46, N 2/3. P. 129–150.
5. Курдянов А.В. Радиальный прирост хвойных в лесотундре и северной тайге Средней Сибири. Роль факторов внешней среды: автореф. дис. ... д-ра биол. наук. Красноярск, 2017. 38 с.
6. Горелова А.К. Концепция экспозиции «Тунгусский феномен» // 100 лет падению Тунгусского метеорита (эстафета поколений): Материалы всерос. науч.-практ. конф., Красноярск, 26–30 июня 2008. Красноярск: ИПК СФУ, 2008. С. 148–154.
7. Гладышева О.Г., Скородумов Д.В. Связь радужного следа Тунгусского космического тела с траекторией полета // Оптика атмосф. и океана. 2014. Т. 27, № 11. С. 995–998.
8. Кулик Л.А. Картина вывала и ожога в районе падения тунгусского метеорита // Вопросы метеоритики. Томск: Изд-во Том. ун-та, 1976. С. 15–19.
9. Абрамов Н.Г., Аркаев Е.А., Русских А.Г. Исследование пожара 1908 года в районе падения Тунгусского метеорита. Тунгусский заповедник. Биоценозы северной тайги и влияние на них экстремальных природных факторов // Тр. ГПЗ «Тунгусский». Томск: Изд-во Том. ун-та, 2003. Вып. 1. С. 275–288.
10. Красавчиков В.О., Яшков Д.В. О пространственном распределении следов катастрофного пожара 1908 г. // 100 лет падению Тунгусского метеорита (эстафета поколений): Материалы всерос. науч.-практ. конф., Красноярск, 26–30 июня 2008. Красноярск: ИПК СФУ, 2008. С. 226–236.
11. Ageev B.G., Gruzdev A.N., Sapozhnikova V.A. Cyclic variation of residual ($\text{CO}_2+\text{H}_2\text{O}$) and total pressure in conifer stem and woody root tree rings // J. Sib. Fed. Univ. Biol. 2018. V. 11, N 3. P. 206–217. DOI: 10.17516/1997-1389-0066.
12. Ageev B.G., Gruzdev A.N., Savchuk D.A., Ponomarev Yu.N., Sapozhnikova V.A. The characteristics of residual tree-ring CO_2 and H_2O chronologies for conifer species // Advances in Sensors: Rev. V. 3. Barcelona: IFSA, 2016. Ch. 5. P. 115–134.
13. Васильев Н.В. Тунгусский метеорит. Космический феномен лета 1908 г. М.: Русская панорама, 2004. 359 с.
14. Парфенова Е.И. Экологические факторы роста после катастрофного леса в районе Тунгусского события //

- 100 лет падению Тунгусского метеорита (эстафета поколений): Материалы всерос. науч.-практ. конф., Красноярск, 26–30 июня 2008. Красноярск: ИПК СФУ, 2008. С. 313–318.
15. *Douglass A.E.* Climatic cycles and tree-growth // *Sci. Month.* 1933. V. 37, N 6. P. 481–495.
16. *Ишков В.Н.* Периоды «пониженной» и «повышенной» солнечной активности: наблюдательные особенности и ключевые факты // *Солнечная и солнечно-земная физика* – 2013. СПб.: ВВМ, 2013. С. 111–114.
17. *The Sun and Solar Activity* // Space Weather Service, Australia, 2022. URL: <https://www.sws.bom.gov.au/Educational/2/3/1> (last access: 25.03.2022).
18. *Кнорре А.А., Сафаргалеев Р.Р., Мейдус А.В.* Влияние пожаров на динамику радиального прироста сосны (*Pinus sylvestris* L.) и ели (*Picea obovata* Ledeb) в северной тайге юга Эвенкии // Сб. науч. статей межвузовского науч. конгресса «Высшая школа: научные исследования». М.: 2020. Т. 2. С. 127–135.

B.G. Ageev, V.A. Sapozhnikova, A.N. Gruzdev, D.A. Savchuk. **Variations in ring width and gas components in wood of larch trees injured by the fire of 1908.**

The CO₂ content in tree wood and the radial increment of trees can change under the impact of ground fires. The larch discs under study survived the fire of 1908 after the explosion of the space body in the Podkamennaya Tunguska revealed a number of features in the behavior of absorbed CO₂ and (CO₂ + H₂O) in larch wood. The photoacoustic analysis of samples vacuum-desorbed from tree rings has shown a long-term annual accumulation of CO₂ and (CO₂ + H₂O) in tree stems after 1908. A change in CO₂ release cycling in the post-catastrophic period is ascertained. A change in variation cycling is also noted in the tree ring chronologies. According to the analysis of the correlation coefficients, the specific behavior of the larch ring width chronologies in this region is most likely due to variations in the solar activity.

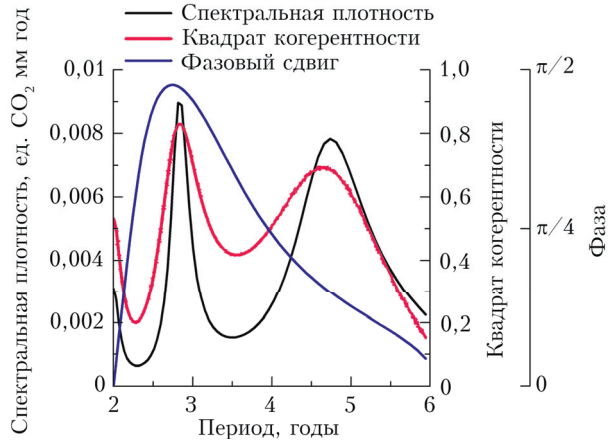


Рис. 4. Кросс-спектр между хронологиями CO₂ и шириной колец спила **D1** в посткатастрофный период (1911–1934 гг.)

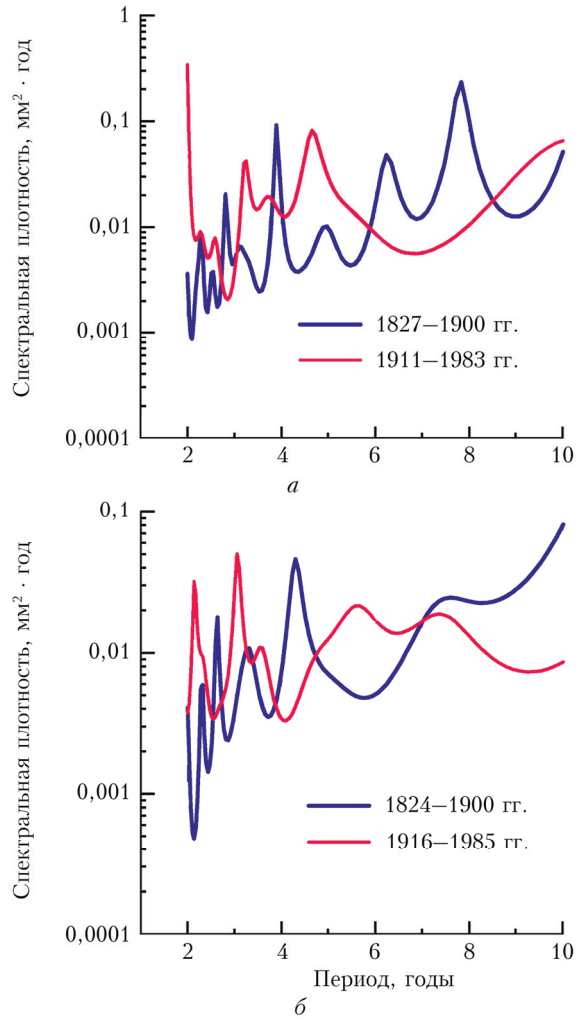


Рис. 5. Спектры ширины годичных колец спилов **D1** (а) и **D2** (б) до и после катастрофы 1908 г.