

РАДИАЦИЯ И БИОСФЕРА

УДК 581.5+581.134.5:581.824+582.475+551.510.534

## Изменение радиального роста и распределения CO<sub>2</sub> в древесине лиственниц, переживших взрыв тунгусского болида

Б.Г. Агеев<sup>1</sup>, В.А. Сапожникова<sup>1</sup>, Д.А. Савчук<sup>2\*</sup>

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

<sup>2</sup>Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН  
634055, г. Томск, пр. Академический, 10/3

Поступила в редакцию 3.02.2021 г.

Опτικο-акустическим методом проведен анализ газовых проб, извлекаемых вакуумным методом из спилов лиственниц, переживших взрыв космического тела в районе р. Подкаменной Тунгуски в 1908 г. Выявлена специфика накопления CO<sub>2</sub> в годичных кольцах после катастрофы, что могло сказаться на динамике выделения стволами CO<sub>2</sub> в атмосферу.

*Ключевые слова:* Тунгусское космическое тело, спилы лиственниц, CO<sub>2</sub>; Tunguska space body, larch discs, CO<sub>2</sub>.

### Введение

30 июня 1908 г. в сибирской тайге в районе р. Подкаменной Тунгуски произошел взрыв космического тела (ТКТ), еще называемого «тунгусским метеоритом». По оценкам [1], взрыв произошел на высоте 5–10 км и повалил лес на площади 2150 ± ± 25 км<sup>2</sup>, низовой пожар повредил растительность на площади > 100 км<sup>2</sup>. Многочисленные исследования района падения позволили выявить довольно быстрое восстановление леса после катастрофы, ускоренный прирост выживших деревьев [1] и усиленный прирост деревьев в высоту [2]. На ветвях многих выживших деревьев оказались следы радиационного поражения (ожога), данные по которым используются в модельных расчетах параметров ТКТ [3].

Леса занимают ~ 70% площади района катастрофы. Преобладают смешанные лиственнично-сосновые и березово-сосново-лиственничные древостои [4]. Известно, что лесные экосистемы за счет фотосинтеза способны на длительный срок аккумулировать атмосферный углерод. Однако леса сами поставляют в атмосферу значительное количество CO<sub>2</sub>: средневозрастное дерево тратит на дыхание в виде CO<sub>2</sub> ~ 60% углерода, поглощенного при фотосинтезе. При этом, по некоторым оценкам, по мере старения дерева доля углерода, расходуемого на дыхание, возрастает [5], а изотопный состав выдыхаемого деревьями CO<sub>2</sub> меняется [6]. Содержание CO<sub>2</sub> в стволе оце-

нивается от ~ 1 до 26%, что превышает содержание CO<sub>2</sub> в атмосфере приблизительно в 30–750 раз [7]. В процентном отношении доля дыхания древесных тканей стволов и ветвей составляет ~ 25% полного автотрофного дыхания хвойных бореальных лесов, почти 50% дыхания лиственных лесов и претерпевает суточные и сезонные колебания [8]. В глобальном масштабе в последние десятилетия леса бореальной зоны, характеризующиеся замедленным биологическим круговоротом, рассматриваются как нетто-сток CO<sub>2</sub>. На территории России сосредоточена почти четверть всех лесов планеты и большая часть бореальных лесов [5], но, несмотря на обширные территории, до сих пор не существует системы мониторинга CO<sub>2</sub> лесных экосистем [9, 10], особенно актуального в период экологических катастроф.

Предлагаемая методика исследования вариаций CO<sub>2</sub> в древесине колец спилов дает возможность проследить за погодичным изменением выделения CO<sub>2</sub> клетками (изменением дыхания) и найти корреляцию с рядом изменяющихся внешних условий. По нашим представлениям, сохранившаяся в древесине спилов вода («связанная» вода) может содержать долю того CO<sub>2</sub>, который образовался при росте древесного кольца [11, 12].

Цель настоящей работы – исследование поведения CO<sub>2</sub> и (CO<sub>2</sub> + H<sub>2</sub>O) в годичных кольцах спилов деревьев, переживших катастрофу: взрыв ТКТ в 1908 г. и пожар. При этом природа ТКТ в статье не обсуждается. Для извлечения газовой пробы, содержащей CO<sub>2</sub> и (CO<sub>2</sub> + H<sub>2</sub>O), использовался вакуумный метод, анализ пробы производился опτικο-акустическим газоанализатором с перестраиваемым по частоте CO<sub>2</sub>-лазером [11, 12]. Изучение динамики

\* Борис Григорьевич Агеев (ageev@iao.ru); Валерия Александровна Сапожникова (sapo@iao.ru); Дмитрий Анатольевич Савчук (savchuk@imces.ru).

газосодержания растений, переживших катастрофу, дает возможность судить о вариациях накопления  $\text{CO}_2$  в древесных кольцах и изменении диффузного обмена стволового  $\text{CO}_2$  с атмосферой после катастрофы. Работа расширяет список экспериментальных данных по району взрыва ТКТ и может представлять интерес для специалистов, занимающихся проблемами атмосферно-биосферного обмена в экологически неблагоприятных районах.

## Материалы и методы

Исследования проводились на двух спилах лиственниц, Л1 и Л2, привезенных из района катастрофы участниками Комплексной самодеятельной экспедиции (КСЭ, Томск), работавших по программе «Лес» в районе Тунгусского взрыва. В 1981–1991 гг. в экспедициях осуществлялся поиск деревьев, выживших после пожара 1908 г. Обработка данных исследования показала [13], что пожар имел достаточно низкую интенсивность и распространился на площади порядка 90 тыс. га. Установлено, что сначала энергия взрыва подожгла только сухую хвою и листья, а также ягель, для воспламенения которых необходимо воздействие излучения интенсивностью 4 кал/см<sup>2</sup> в течение 2 с. Как раз возгорание этой подстилки и привело к возникновению широкомасштабного низового пожара, который смог подпалить только кору деревьев, не повредив древесину. Кроме того, была существенно повреждена корневая система [14]. Дальнейшие многолетние работы позволили [15]: 1) создать геоинформационную модель пожарных проявлений территории Тунгусского взрыва 1908 г. и карту зоны леса, пораженного пожаром; 2) оценить максимальную высоту пламени (1,3 м) и сделать вывод, что пожар имел несколько локальных источников.

Исследуемые в настоящей работе спилы лиственниц отбирались в разных районах катастрофы: Л1 – в районе р. Чавидокон (возможная граница пожара), Л2 – около эпицентра. Спилы брались в 1987 г., но данных по ширине кольца за этот год нет, так как деревья спиливались в начале сезона, когда кольца только начали формироваться. Диаметры спилов: Л1 – в коре 20,5 см, без коры 18 см, Л2 – 19 и 14 см соответственно. Толщина обоих спилов ~ 3 см (рис. 1).

Сначала измерялась ширина годовичных колец (радиальный прирост) спилов на измерительном комплексе LINTAB с точностью 0,01 мм. Количество колец на спилах Л1 и Л2 составило 169 и 160 шт. Поскольку спилы брались на высоте ~ 0,7 м от земли, с учетом величин радиального прироста и биологии лиственницы можно заключить, что возраст обоих деревьев был ~ 180–190 лет.

Методика проведения экспериментов подробно описана в [11, 12]. Древесина каждого кольца состругивалась, помещалась в экспозиционную камеру, в которой создавался невысокий (~ 10<sup>-1</sup> торр) вакуум, позволяющий сорбированным древесиной газам переместиться в экспозиционную камеру,

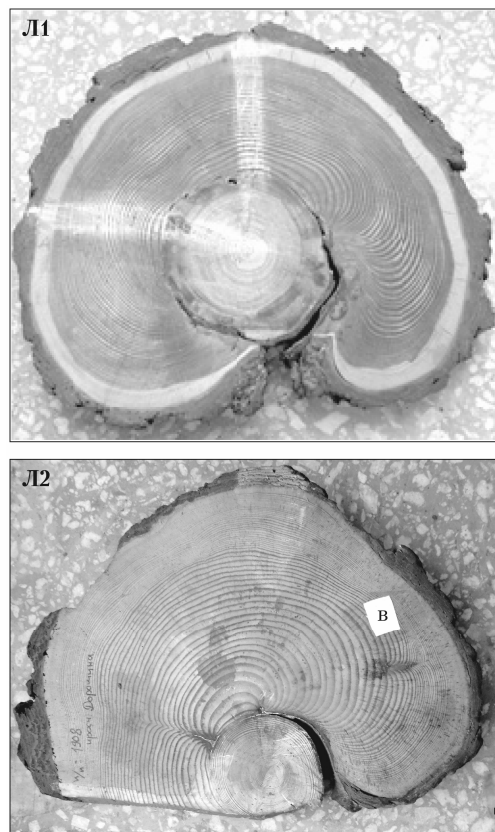


Рис. 1. Внешний вид спилов лиственниц с места катастрофы

при этом манометром можно было фиксировать давление выделившейся пробы газа. Исследование погодичных вариаций состава выделившихся проб проводилось на лазерном оптико-акустическом спектрометре, где в качестве источника излучения использовался перестраиваемый по частоте  $\text{CO}_2$ -лазер. Измерения проводились на трех линиях генерации лазера, совпадающих с линиями поглощения  $\text{CO}_2$ , результат усреднялся. Для анализа использовались сигналы газоанализатора на выбранных линиях, так как они с точностью до постоянного (калибровочного) множителя пропорциональны парциальному давлению (концентрации) исследуемых газов.

Так как мы полагали, что древесина погодично сохраняет долю транспирационной воды вместе с частью выдыхаемого растением  $\text{CO}_2$ , нашей задачей также было исследование хронологий ( $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ ) при использовании четвертой линии генерации, совпадающей с линией поглощения  $\text{CO}_2$  и с сильной линией поглощения  $\text{H}_2\text{O}$ . Предлагаемый метод дает возможность получения данных по погодичной вариации содержания паров воды в кольцах путем вычитания сигнала  $\text{CO}_2$  из сигнала ( $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ ). Предварительная калибровка оптико-акустического газоанализатора позволяла определять парциальное давление исследуемых газов. Кольца спилов деревьев в районе падения ТКТ характеризуются небольшой шириной, и в ряде случаев разделить древесину соседних колец было невозможно. Тогда измерение сигнала проводилось для суммы таких

узких колец, и каждое кольцо характеризовалось средним значением  $\text{CO}_2$ . Для определения циклических характеристик использовался пакет программ ORIGIN.

## Результаты

Результаты измерений приведены на рис. 2. Динамика радиального прироста лиственниц позволила выделить три этапа (рис. 2, а). На первом этапе (рост до пожара 1908 г.) длительностью ~80–90 лет прирост сначала составлял в среднем 0,6 мм, в отдельные годы достигая 1,1 мм, затем снизился в среднем на 0,3 мм в год. На втором этапе (в течение 30 лет после пожара) в первые годы прирост

резко увеличился и достиг 2,7 мм по измеренному радиусу спила, а на соседних радиусах составил до 4 мм, а затем неуклонно снижался (1,2 мм в год). На третьем этапе (последние 40 лет) прирост резко снизился до допожарных величин (в среднем 0,2 мм в год).

Погодичное распределение  $\text{CO}_2$  в спилах, как видно из рис. 2, б, повторяет картину радиального прироста. По нашим оценкам, для спила Л1 сигнал от  $\text{CO}_2$  в послепожарном 1911 г. на порядок превышал значение сигнала от  $\text{CO}_2$  допожарного периода, и после 1908 г. ~40 лет содержание сохранившегося  $\text{CO}_2$  в кольцах было повышенным и варьировалось, по нашим оценкам, в пределах 100–400 ppm. Корреляция между шириной колец и содержанием  $\text{CO}_2$

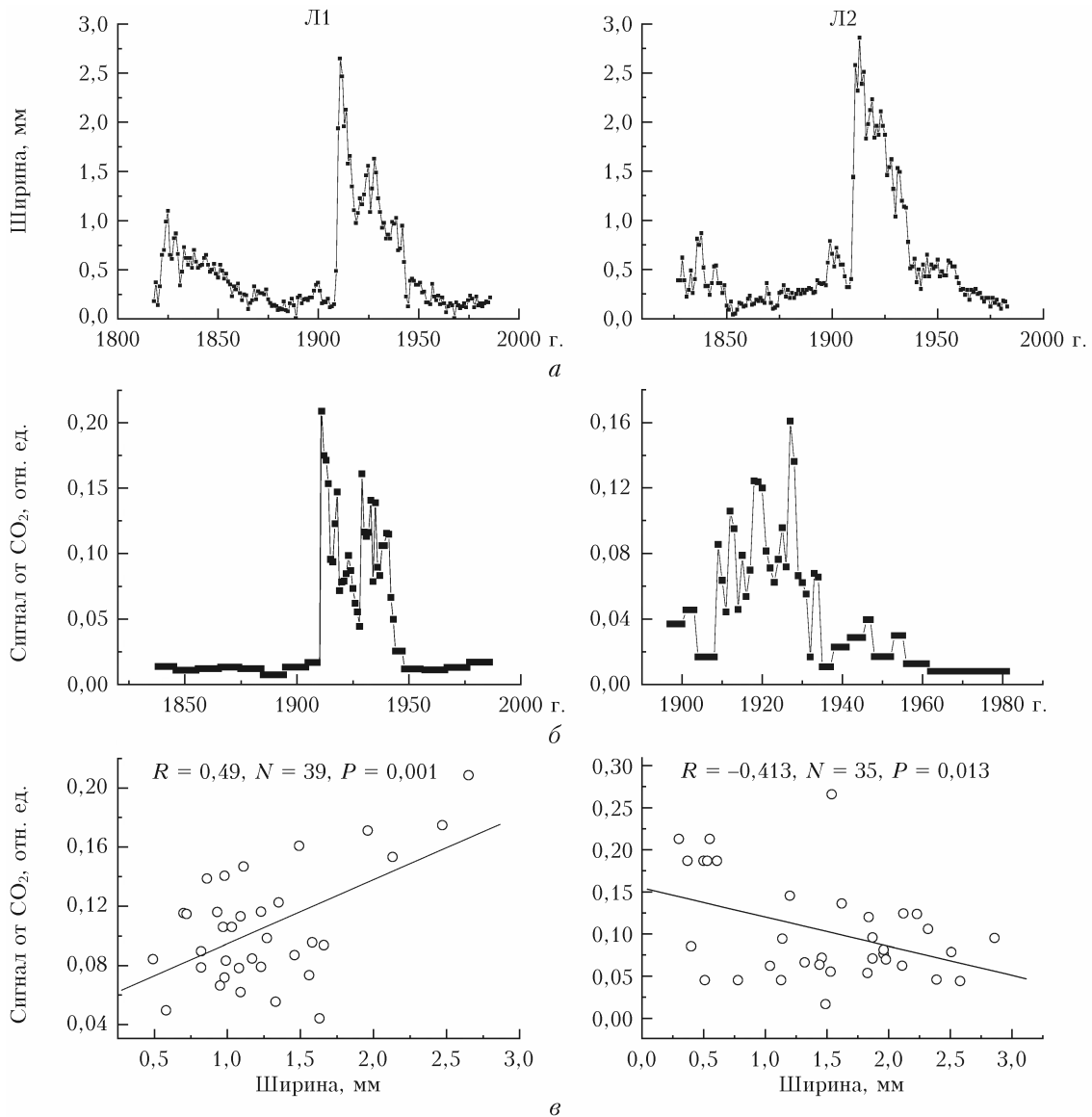
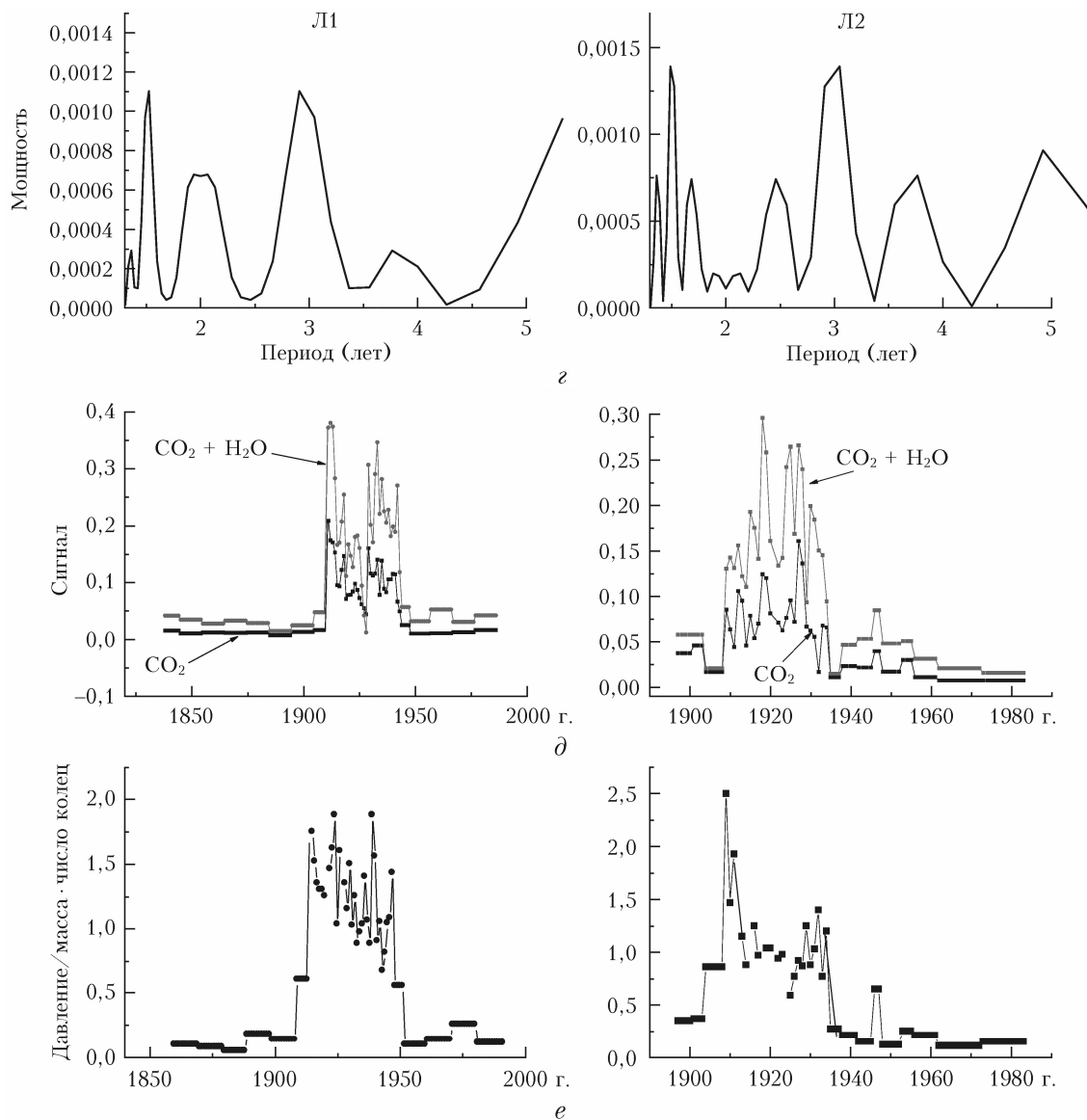


Рис. 2. Результаты измерений характеристик спилов лиственниц Л1 (слева) и Л2 (справа): а – изменения ширины годичных колец в спилах; б – вариации оптико-акустического сигнала, пропорциональные содержанию  $\text{CO}_2$  в кольцах; в – корреляция между сигналом от  $\text{CO}_2$  и шириной колец за период 1909–1943 гг. ( $R$  – коэффициент корреляции,  $N$  – число измерений,  $P$  – значимость корреляции); г – результаты FFT-анализа данных по  $\text{CO}_2$  за 1909–1943 гг.; д – вариации оптико-акустического сигнала от  $\text{CO}_2$  и ( $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ ); е – вариации давления в газовых пробах, извлекаемых под вакуумом из древесины колец. Окончание рисунка на с. 229



Окончание рис. 2. Начало на с. 228

в них (рис. 2, *б*) в этот период оказалась достоверной и разнонаправленной:  $R = 0,49$  (при  $P = 0,001$ ,  $N = 39$ ) для Л1 и  $R = -0,413$  (при  $P = 0,013$ ,  $N = 35$ ) для Л2. Фурье-анализ (FFT) данных по CO<sub>2</sub> за 1909–1943 гг. (рис. 2, *з*) – послепожарного повышенного прироста – не выявил преобладающих циклов: есть 2-, 3- и 4-летние в равной степени.

Во всех кольцах двух спилов фиксируется присутствие H<sub>2</sub>O (рис. 2, *д*): сигнал от (CO<sub>2</sub> + H<sub>2</sub>O), регистрируемый на линии 10R (20) CO<sub>2</sub>-лазера, больше, чем сигнал только от CO<sub>2</sub>, измеренного на других трех линиях генерации CO<sub>2</sub>-лазера: 10P (20, 16, 14).

Последней характеристикой двух спилов является погодичная вариация давления (нормированного на вес образца и число его колец) в извлекаемых под вакуумом газовых пробах. Из рис. 2, *е* видно, что давление газовой компоненты в кольцах в послепожарный период в несколько раз превышало давление до пожара.

Одним из основных катастрофических событий, связанных с деревьями, при рассмотрении взрыва ТКТ в сибирской тайге в 1908 г. был пожар. Он и его последствия определили дальнейший рост и функционирование деревьев. Вообще пожары в том районе – обычное явление, обусловленное наступлением длительного периода без дождей в июне – начале июля [16]. Измерения на спилах показали, что во время катастрофы 1908 г. диаметр (без коры) изучаемых деревьев лиственницы составлял 7 см, а возраст – 90–100 лет. Такое соотношение диаметра и возраста, низкие величины и тренд изменения радиального прироста приводят к заключению, что эти очень молодые деревья находились в угнетенном состоянии из-за конкуренции с соседними деревьями за свет и минеральные вещества.

Произошедший низовой пожар, судя по его следам на спилах, повредил стволы наполовину или на три четверти окружностей. Ширина колец после пожара резко увеличилась, что неоднократно

отмечалось в литературе (например, [17]). Причины ускоренного прироста деревьев изложены в обзоре [18]: улучшение экологических условий в результате вывала и пожара, что вызвало снижение конкуренции между деревьями; стимулирующее действие вещества метеорита; совпадение с фазой подъема внутривековой и вековой изменчивости прироста деревьев.

Предлагаем еще одно объяснение ускоренного роста древесины после пожара 1908 г. в дополнение к вышеперечисленным. При пожаре пострадал камбий — ткань ствола, обеспечивающая нарастание древесины деревьев в толщину. После нанесения пожаром серьезной раны на стволе дерева обычно происходит компенсаторное зарастание древесины со сторон ствола, окружающих рану. Это четкий индикатор нарушающего воздействия на ствол [19]. Древесина с сильно увеличенным приростом (так называемая каллусная ткань), которую четко видно на спилах на рис. 1, разрастается от краев раневой поверхности ствола, защищает место ранения, способствует заживлению раны, накапливает питательные вещества. Возможно, что накопление в кольцах  $\text{CO}_2$ , который является антагонистом этилена и препятствует гниению, ускоряет этот процесс.

Предложенная методика анализа проб газов, извлекаемых из древесины колец спилов, дает возможность получить хронологию концентрации  $\text{CO}_2$ , отражающие изменение процессов его выделения клетками в разные годы жизни дерева. Было найдено, что одновременно с изменением ширины кольца после катастрофы в 1909–1943 гг. наблюдался рост концентрации  $\text{CO}_2$  (усиление дыхания) в кольцах. Хотя обнаруженная корреляция между шириной годовичного кольца и  $\text{CO}_2$  для спилов Л1 и Л2 оказалась различной, что связано с различиями условий произрастания деревьев [12], существование корреляции между шириной годовичного кольца и концентрации  $\text{CO}_2$  свидетельствует об одновременном влиянии катастрофических событий на эти параметры.

Известно, что выделение  $\text{CO}_2$  стволами в атмосферу имеет суточный и сезонный характер. Результаты Фурье-анализа вариаций содержания  $\text{CO}_2$  в спилах в период усиленного прироста показывают, что цикличность сохранившегося  $\text{CO}_2$  2- и 3-летняя. Это может говорить о том, что диффузное поступление ствольного  $\text{CO}_2$  в атмосферу может носить аналогичный характер. Найденное изменение давления газовых проб после пожара может указывать на усиление дыхания растения и дополнительное поступление  $\text{CO}_2$  в атмосферу.

Корреляция между хронологиями  $\text{CO}_2$  и шириной годовичного кольца заставляет по-новому взглянуть на результаты работы [20]. Авторами был проведен анализ 68 древесно-кольцевых хронологий деревьев обширного района от места падения ТКТ до Таймыра на площади ~ 2 млн. км<sup>2</sup> (с разрешения авторов приводим фрагмент карты, рис. 3). Анализ выявил значительное увеличение ширины кольца 1908 г. в спилах этого района. Учитывая существование обнаруженной корреляции между хронологиями  $\text{CO}_2$  и шириной колец, можно предположить,

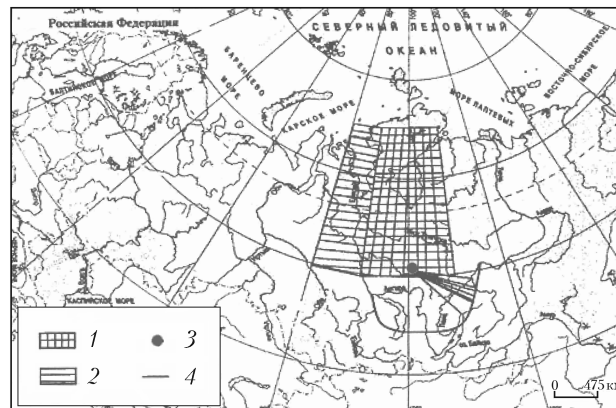


Рис. 3. Зона наблюдения ускоренного роста деревьев после падения ТКТ: территория, где величина прироста по отношению к среднему значению за предыдущие 10 лет составила 112% и 70%. (1, 2), эпицентр взрыва (3), предполагаемые траектории полета и зона наблюдения оптических явлений, сопровождающих полет ТКТ (4) [20]

что на этой территории в атмосферу поступило значительное количество ствольного  $\text{CO}_2$ . Заметим, что обозначенный авторами район совпадает с последними представлениями траектории полета ТКТ [21]. Кроме того, район может быть следом «рикошетного» полета ТКТ [22].

## Заключение

Исследования хронологий радиального прироста двух лиственниц, переживших катастрофу 1908 г., и извлекаемых вакуумным методом из древесины колец их спилов  $\text{CO}_2$  ( $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ ) показали следующее:

1. Катастрофа 1908 г. в районе р. Подкаменной Тунгуски вызвала резкое и значительное увеличение радиального прироста деревьев из-за улучшения экологических условий в результате образовавшегося вывала леса и пожара, возможного стимулирующего действия вещества метеорита и других факторов.

2. Одновременно с увеличением радиального прироста в древесине колец исследуемых спилов лиственниц в те же года наблюдался рост концентрации  $\text{CO}_2$  и совместного ( $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ ), при этом между хронологиями  $\text{CO}_2$  и радиального прироста существовала достоверная и разнонаправленная корреляция (разнонаправленность объяснялась различными условиями произрастания лиственниц).

3. Зафиксированный рост  $\text{CO}_2$  в древесине колец и увеличение давления в пробах газа после пожара 1908 г. могут сигнализировать о том, что в атмосферу в течение достаточно продолжительного периода диффузно поступало больше ствольного  $\text{CO}_2$  после катастрофы. Очевидно, что пораженные пожаром деревья будут поставлять в атмосферу дополнительное количество  $\text{CO}_2$ , — это связано с усилением дыхания стволов.

Таким образом, анализ хронологий ширин колец и сохранившегося в древесине колец  $\text{CO}_2$  позволяет

проследить историю жизни дерева, характер его роста и дыхания даже в условиях катастроф.

Авторы выражают глубокую благодарность участникам КСЭ И.К. Дорошину (г. Томск) и Д.В. Яшкову (г. Новосибирск), которые предоставили материалы для эксперимента. Особую благодарность авторы выражают А.Ю. Ольховатову (г. Москва) за инициирование этой работы.

Работа выполнена в рамках госзадания ИОА СО РАН.

1. *Vasilyev N.V.* The Tunguska Meteorite problem today // *Planet. Space Sci.* 1998. V. 46, N 2/3. P. 129–150.
2. *Парфенова Е.И.* Экологические факторы роста после-катастрофного леса в районе Тунгусского события // 100 лет падению Тунгусского метеорита (эстафета поколений): матер. всерос. науч.-практ. конф. Красноярск, 26–30 июня 2008. Красноярск: ИПК СФУ, 2008. С. 1–5.
3. *Johnstona C.O., Stern E.C.* A model for thermal radiation from the Tunguska airburst // *Icarus.* 2019. V. 327. P. 48–59. DOI: 10.1016/j.icarus.2019.01.028.
4. *Васильев Н.В., Львов Ю.А., Плеханов Г.Ф., Логунова Л.Н., Мульдьяров Е.Я., Бибикина В.В., Волков А.Е., Кузьмин С.Л., Лапина Е.Д., Папанотида А.И., Сергиева З.М., Сидоров К.С., Травинский И.В., Шофтель Б.И., Щербина С.С.* Государственный природный заповедник «Тунгусский» (очерк основных данных) // Тунгусский заповедник. Биоценозы северной тайги и влияние на них экстремальных природных факторов. Труды гос. природ. заповедника «Тунгусский». Томск: Изд-во Том. гос. ун-та, 2003. Вып. 1. С. 33–89.
5. *Hytteborn H., Maslov A.A., Nazimova D.I., Rysin L.P.* Boreal forests of Eurasia // *Coniferous Forests.* Amsterdam: Elsevier, 2005. V. 6. P. 23–99.
6. *Zhao R., Hölscher D.* The concentration and efflux of tree stem CO<sub>2</sub> and the role of xylem sap flow // *Front. Biol. China.* 2009. V. 4, N 1. P. 47–54.
7. *Barba J., Poyatos R., Var R.* Automated measurements of greenhouse gases fluxes from tree stems and soils: Magnitudes, patterns and drivers // *Sci. Rep.* 2019. V. 9, N 4005. P. 1–13. DOI: 10.1038/s41598-019-39663-8.
8. *Суворова Г.Г., Попова Е.В.* Фотосинтетическая продуктивность хвойных древостоев Иркутской области. Новосибирск: Гео, 2015. 95 с. [Электронный ресурс]. URL: [http://www.sifibr.irk.ru/images/publications/suvorova\\_monogr.pdf](http://www.sifibr.irk.ru/images/publications/suvorova_monogr.pdf).
9. *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 ЗОТТО за 2009–2015 гг.) // *Метеорол. и гидрол.* 2018. № 5. С. 20–29.
10. *Аришинов М.Ю., Белан Б.Д., Давыдов Д.К., Креков Г.М., Фофанов А.В., Бабченко С.И., Inoue G., Machida T., Maksutov Sh., Sasakawa M., Shimoyama K.* Динамика вертикального распределения парниковых газов в атмосфере // *Оптика атмосф. и океана.* 2012. Т. 25, № 12. С. 1051–1061.
11. *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. Biol.* 2018. V. 11, N 3. P. 206–217. DOI: 10.17516/1997-1389-0066.
12. *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 атмосферы и океана.* 2019. Т. 32, № 2. С. 105–112; *Ageev B.G., Sapozhnikova V.A., Gruzdev A.N., Golovatskaya E.A., Dukarev E.A., Savchuk D.A.* Comparison of Residual Gas Characteristics in Annual Rings of Scots Pine Trees. // *Atmos. Ocean. Opt.* 2019. V. 32, N 3. P. 275–283.
13. *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. Труды гос. природ. заповедника «Тунгусский». Томск: Изд-во Том. гос. ун-та, 2003. Вып. 1. С. 275–278.
14. *Плеханов Г.Ф., Мульдьяров Е.Я., Сальникова Г.А., Гришин Ю.А.* Особенности вывала и пожара в центральной зоне тунгусской катастрофы // Чтения памяти Ю.А. Львова. Томск: НИИББ при ТГУ, 1995. С. 178–182.
15. *Красавчиков В.О., Яшков Д.В.* О пространственном распределении следов катастрофического пожара 1908 г. // 100 лет падению Тунгусского метеорита (эстафета поколений): матер. всерос. науч.-практ. конф. Красноярск, 26–30 июня 2008. Красноярск: ИПК СФУ, 2008. С. 1–11.
16. *Панюшкина И.П., Арбатская М.К.* Дендрохронологический подход к исследованию горимости лесов Эвенкии // *Сибир. эколог. журн.* 1999. № 2. С. 167–173.
17. *Сапунов В.Б., Половая О.В.* Экологические аспекты Тунгусского феномена 1908 г. // Ученые записки Рос. гос. гидрометеорол. ун-та. 2009. № 10. С. 86–100.
18. *Несветайло В.Д.* К вопросу об ускоренном приросте деревьев района падения Тунгусского метеорита // Следы космических воздействий на Землю. Новосибирск: Наука, 1990. С. 165–171.
19. *Николаева С.А., Савчук Д.А.* Методы дендроиндикации экзогенных гравитационных процессов: обзор // *Изв. РАН. Сер. географ.* 2020. Т. 84, № 3. С. 441–450. DOI: 10.31857/S2587556620030097.
20. *Касаткина Е.А., Шумилов О.И.* Еще одна загадка Тунгусской катастрофы? // Письма в ЖЭТФ. 2007. Т. 85, № 4. С. 255–259.
21. *Злобин А.Е.* Результаты расчетно-экспериментального и полевого исследования Тунгусской космической катастрофы (к 110-летию события 1908 года) // Современные научные исследования и инновации. 2018. № 6. URL: <http://web.snauka.ru/issues/2018/06/87130>.
22. *Khrennikov D.E., Titov A.K., Ershov A.E., Pariev V.I., Karpov S.V.* On the possibility of through passage of asteroid bodies across the Earth's atmosphere // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 2020. V. 493. P. 1344–1351. DOI: 10.1093/mnras/staa329.

**B.G. Ageev, V.A. Sapozhnikova, D.A. Savchuk. Changes in the radial growth and distribution of CO<sub>2</sub> in larches survived the explosion of the Tunguska space body.**

A photoacoustic method was used to analyze gas samples vacuum-extracted from larch discs that survived the explosion of a space body in the Podkamennaya Tunguska area in 1908. The specificity of CO<sub>2</sub> accumulation in tree rings after the catastrophe was revealed, which could affect the dynamics of CO<sub>2</sub> emission by the trunks into the atmosphere.