

ПРОЯВЛЕНИЯ ИЗВЕРЖЕНИЯ ВУЛКАНА ЛАКИ (1783 Г.) В СВЕТЛЫХ ГОДИЧНЫХ КОЛЬЦАХ ЛИСТВЕННИЦЫ ИЗ ВЫСОКИХ ШИРОТ СИБИРИ

М. А. Гурская

Институт экологии растений и животных Уральского отделения РАН (Екатеринбург, Россия)

Статья поступила в редакцию 14 января 2025 г.

Для цитирования

Гурская М. А. Проявления извержения вулкана Лаки (1783 г.) в светлых годичных кольцах лиственницы из высоких широт Сибири // Арктика: экология и экономика. — 2025. — Т. 15, № 2. — С. 265—276. — DOI: 10.25283/2223-4594-2025-2-265-276.

Проанализированы сведения о неблагоприятных событиях летнего периода 1783 г. на основе изменений анатомического строения годичных колец лиственниц, произрастающих в высоких широтах Сибири. Кernels лиственниц собраны на 32 точках на лесотундровой трансекте протяженностью 4000 км. Почти на каждой точке у деревьев сформировались светлые кольца различной выраженности. Выделены районы со сходным распределением неблагоприятных погодных событий. На основе светлых колец обсуждаются погодные особенности вегетационного периода в высоких широтах Сибири. Знание о влиянии крупных извержений вулканов Исландии на климат сибирской лесотундры позволяет понять потенциальные последствия подобных извержений в будущем на биоту и социально-экономическую деятельность человека в высоких широтах Сибири.

Ключевые слова: вулканы, изменение климата, лиственница, светлые годичные кольца, высокие широты Сибири.

Введение

Вулканические извержения — одно из распространенных катастрофических природных событий. Последствия крупных извержений вулканов необходимо знать для понимания их возможного воздействия на экосистемы и социум с целью предотвращения или снижения социально-экономических издержек. Извержения прямо влияют на окружающую вулкан среду, а также оказывают косвенное влияние на климат планеты. Известно, что крупные извержения вулканов понижают температуру воздуха до 1,5°C в последующие год-два [1]. В результате извержения в атмосферу выбрасывается огромное количество вулканического обломочного материала

различного размера, аэрозолей и различных газов, главным образом SO₂ и CO₂. Поток солнечной энергии отражается от выброшенных в воздух мелких частиц (вулканического пепла и пыли) и от аэрозолей. Изменения в составе атмосферы, произошедшие в результате извержения, ведут к краткосрочным климатическим изменениям в годы, следующие после извержений вулканов, в основном из-за снижения приходящей солнечной радиации [1; 2].

В результате изменения состава атмосферы и радиационного баланса последствия извержений вулканов проявляются в виде необычайных неблагоприятных погодных событий и климатических экстремумов: летних заморозков, экстремально короткого/холодного лета и дымки или сухого тумана (англ. dry fog) в течение вегетации [3]. В природе

различные следы прошлых крупных извержений (выбросы пепла, климатические и погодные аномалии) фиксируются в ледовых кернах [4], кораллах [5] и деревьях [6].

Окружающая среда оказывает прямое влияние на ширину годичного кольца. Измерение ширины годичных колец дает обобщенное представление об условиях вегетационного сезона, в который формируется данное кольцо [7]. Многочисленными исследованиями подтверждено, что в годы, следующие после крупных извержений, уменьшаются ширина годичного кольца и максимальная плотность поздней древесины [8—10]. Особенно это снижение выражено в экстремальных условиях произрастания деревьев [7; 8].

Кроме уменьшения ширины годичного кольца под влиянием погодных условий, вызванных последствиями крупных извержений, наблюдаются изменения в анатомической структуре колец. Одним из них является формирование светлых колец [11—13], характеризующихся светлой окраской по сравнению с прилегающими кольцами. Такая окраска обусловлена различными причинами. На тканевом уровне светлые кольца проявляются в виде сравнительно небольшого числа слоев клеток поздней древесины, на клеточном уровне — в виде уменьшенной толщины клеточной стенки поздних трахеид или увеличенных размеров лумена [14]. На биохимическом уровне у таких колец можно отметить низкое содержание лигнина, на биофизическом — низкую плотность клеточной стенки [15].

Последствия трещинного извержения Лаки в 1783 г. в Европе

Лаки — щитовидная цепь вулканов с центром на вулкане Гримсвотн (64°03'53" с. ш. 18°13'34" з. д., высота 1719 м над уровнем моря). Крупнейшее извержение Лаки за последние 400 лет отмечено в 1783—1784 гг. Оно началось 8 июня и длилось около восьми месяцев. Это было трещинное извержение, не взрывное, с большим количеством газов, медленно текущей лавой и малым количеством выбросов обломочного материала. Оно не вызывало беспокойства у жителей ближайших населенных пунктов. Погодные условия начала лета в Европе были благоприятными. Более того, отмечалось, что в 1783 г. во многих летописях было зафиксировано жаркое начало лета, отмечались волны тепла и повышенное количество осадков на значительной территории Центральной и Западной Европы [16; 17].

Тем не менее лето 1783 г. наиболее известно как период с аномально стойким сернистым сухим туманом, возникшим в результате извержения Лаки и распространившимся на Европу и большую часть северного полушария во второй половине года. Сухой туман состоял в основном из SO_2 , а также аэрозолей HCl , HF и NH_3 и вызывал раздражение дыхательных путей и мог повлиять на здоровье людей и скота. В Британии гибель 23 тыс. людей из-за

отравления газами приписывается выбросам Лаки, а в Исландии население сократилось на 20% — с 49 609 до 40 381 за 1783—1786 гг. из-за сернокислотных выбросов [18; 19]. По общим оценкам, только количество выбросов SO_2 составило 122 Мт [1; 17]. Из-за этого сернистого тумана очень часто летний период 1783 г. называют в летописях «годом без лета», годом с «кроваво-красным солнцем» [16—20]. С другой стороны, есть исследования, в которых делается вывод, что лето в Западной Европе, скорее всего, было теплым из-за атмосферного блокирования. Ослабление циркуляции атмосферы из-за блокирования способствовало усилению дымки, а наиболее плотная дымка приходилась на дни с волнами тепла [17].

В результате извержения Лаки наступила суровая зима 1783—1784 гг., которая была одной из самых холодных в Европе за 400 лет. Есть сообщения о людях и скоте, замерзших насмерть, о большом количестве снега и сильных морозах на большей части территории Британии и Европы [21]. Косвенные последствия извержения Лаки считаются одними из самых смертоносных за последние 400 лет [22].

Во время извержения кроме газов и аэрозолей в атмосферу выбрасывается большой объем обломочного материала. Объем выбросов твердых частиц оценивается комплексной характеристикой — индексом вулканической активности (Volcanic Explosivity Index — VEI) [23]. Извержение Лаки классифицировано $\text{VEI} = 4$ [24; 25]. Тем не менее, по некоторым оценкам, выброс продуктов извержения за все время составил $15 \text{ км}^3 = 4,2 \cdot 10^{13} \text{ кг}$ [17], что соответствует индексу 6 по шкале VEI и позволяет классифицировать его как самое крупное лавовое извержение за последние 400 лет.

Последствия извержения Лаки на климат в Европе подробно зафиксированы в летописях разных европейских стран. В высоких широтах информация о погодных условиях представлена скудно в связи со слабой транспортной доступностью таких регионов, низкой плотностью населения и, как следствие, отсутствием летописей. В арктических районах Сибири такую оценку можно дать, используя косвенные параметры — годичные кольца деревьев, произрастающих в экстремальных условиях на северной границе распространения. В настоящей работе рассмотрены эффекты влияния извержения Лаки в 1783 г. на анатомическое строение годичных колец лиственницы в высоких широтах Сибири.

Климатические условия района исследования

Район исследования характеризуется субарктическим климатом. Здесь с продвижением с запада на восток наблюдается увеличение амплитуды между зимними и летними температурами за счет понижения зимних температур. Средняя месячная температура января понижается с -25°C в Западной Сибири до -37°C в восточной части Сибири. Лето короткое,

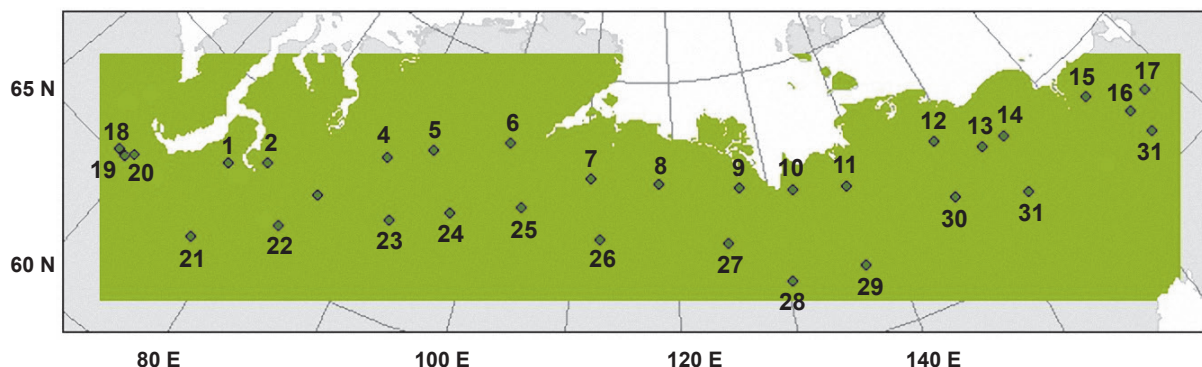


Рис. 1. Карта-схема расположения точек
Fig. 1. Map-scheme of the sites/areas location

прохладное, средняя температура июля составляет 14—15°C. Влажность воздуха высокая, заморозки возможны в течение всего вегетационного периода. Осадков выпадает мало, от 450 до 200 мм в год, за июль-август выпадает до 50% осадков. Снежный покров сравнительно небольшой, его мощность убывает с запада на восток. Летом преобладают ветры северного и северо-восточного направлений. В июне длина светового дня составляет 24 ч. Неравномерное поступление количества солнечной радиации в течение вегетационного сезона производит огромный экологический эффект на биоту. Вегетационный сезон короткий, с продвижением на восток продолжительность вегетационного периода уменьшается со 100 до 40 дней. Основные типы почв — тундровые подбуры, глееземы, подзолы, таежные глее-мерзлотные. Многолетняя мерзлота влияет на процессы почвообразования [26].

Методы исследования

Район исследования расположен в лесотундровой зоне в Сибири между 64,54—72,27° с. ш. и 76—167° в. д. Здесь были заложены два про-

филя — северный и южный. Северный профиль представляет собой границу между северной лесотундрой и тундрой, а южный расположен на 250—350 км южнее и включает переходную зону между тайгой и лесотундрой. На северном профиле заложено 17 точек, а на южном — 15 (рис. 1). Основной материал для этого исследования собран проводившейся в 1992—1993 гг. Международной дендрохронологической экспедицией, организованной докторами биологических наук В. С. Мазепой, С. Г. Шиятовым и др.

В Сибири произрастают три вида лиственницы: лиственница сибирская (*Larix sibirica* Ledeb.), лиственница Гмелина (*Larix gmelinii* Rupr.) и лиственница Каяндера (*Larix cajanderi* Mayr.). В лесотундре они формируют редкостойные леса, редколесья, редины, встречаются одиночно стоящие, многоствольные и многовершинные формы.

На каждой точке собрано от 10 до 39 кернов с доминантных деревьев лиственницы. Условия произрастания чаще были свежими — местообитания с типичной растительностью для данной местности (табл. 1).

Таблица 1. Характеристики точек сбора, количество образцов и годичных колец

Table 1. Characteristics of sites/areas, number of samples and annual tree rings

Точка	Широта	Долгота	Высота, м над уровнем моря	Влажность почвы	Вид	Первый год	Длина	Число кернов	Число колец в 1783 г.
Северный профиль									
1	67,28	76,46	20	Влаж.	L. s.	1561	430	23	20
2	68,08	79,46	30	Влаж.	L. s.	1562	429	18	15
3	68,07	85,03	50	Свеж.	L. s.	1553	438	23	15
4	70,31	89,30	70	Свеж.	L. s.	1615	376	17	8
5	71,20	93,50	70	Свеж.	L. g.	1540	451	24	16
6	72,27	101,45	20	Свеж.	L. g.	1644	347	15	5
7	71,54	111,02	25	Свеж.	L. g.	1570	421	22	13

Точка	Широта	Долгота	Высота, м над уровнем моря	Влажность почвы	Вид	Первый год	Длина	Число кернов	Число колец в 1783 г.
8	71,42	118,35	80	Свеж.	L. g.	1600	391	25	7
9	71,06	127,17	70	Свеж.	L. g.	1425	567	10	10
10	70,57	132,59	20	Свеж.	L. c.	1518	474	21	14
11	70,15	138,10	80	Свеж.	L. c.	1301	691	22	12
12	70,30	148,08	20	Свеж.	L. c.	1425	670	39	22
13	69,28	152,06	30	Свеж.	L. c.	1414	581	29	18
14	69,17	154,46	50	Свеж.	L. c.	1412	580	22	13
15	68,48	163,03	300	Свеж.	L. c.	1468	524	29	25
16	67,12	165,06	470	Сух.	L. c.	1568	424	14	13
17	67,28	167,40	450	Сух.	L. c.	1420	572	23	21
Южный профиль									
18	65,27	68,56	20	Сух.	L. s.	1557	436	26	24
19	65,30	69,28	25	Свеж.	L. s.	1505	488	11	11
20	65,21	69,31	25	Влаж.	L. s.	1609	384	38	36
21	64,54	77,56	70	Свеж.	L. s.	1489	503	24	24
22	66,48	83,35	50	Свеж.	L. s.	1624	367	16	14
23	68,35	92,08	100	Свеж.	L. s.	1624	367	12	4
24	69,32	97,32	400	Свеж.	L. g.	1517	474	18	10
25	70,36	104,15	100	Свеж.	L. g.	1412	579	22	11
26	69,46	112,49	60	Свеж.	L. g.	1400	591	38	17
27	69,17	125,20	130	Свеж.	L. g.	1705	287	25	6
28	67,70	130,50	700	Свеж.	L. c.	1473	519	19	9
29	67,37	137,28	350	Свеж.	L. c.	1559	433	21	14
30	68,27	147,36	140	Свеж.	L. c.	1605	387	28	23
31	67,15	153,42	50	Свеж.	L. c.	1560	432	30	22
32	66,13	165,25	500	Свеж.	L. c.	1407	585	28	21

Примечание. L. s. — *Larix sibirica*, L. g. — *Larix gmelini*, L. c. — *Larix cajanderi*, Свеж. — участок с типичной растительностью, Сух. — участок с периодическими засушливыми периодами (например, склон), Влаж. — периодически влажный участок (например, понижение рельефа).

Note. Свеж. (Fresh) — an area with typical vegetation, Сух. (dry) — an area with seasonal dry periods (e. g. slopes), Влаж. (wet) — periodically wet areas (e. g. depressions).

Керны были наклеены на деревянную подложку и отполированы. Ширина годовых колец была измерена на установке Lintab 5.0 и перекрестно датирована с использованием программного пакета TSAP 3.0. Метод перекрестной датировки основан на сравнении уникальной последовательности изменения ширины годовых колец в определенный временной промежуток. Индивидуальные серии, полученные при измерении ширины годовых колец деревьев, произрастающих в сходных условиях

в одном регионе, имеют сходный рисунок динамики ширины годовых колец [27]. Светлые кольца выявляли под микроскопом в отраженном свете, было использовано увеличение $\times 20$ — 40 . Затем были изготовлены тонкие срезы, окрашены сафранином, далее изготавливались цифровые микрофотографии с увеличением $\times 400$. Измерения на фотографиях выполнялись с использованием программного обеспечения Axio Imager (версия 04.14.2005). В пределах годового кольца было выбрано по пять рядов

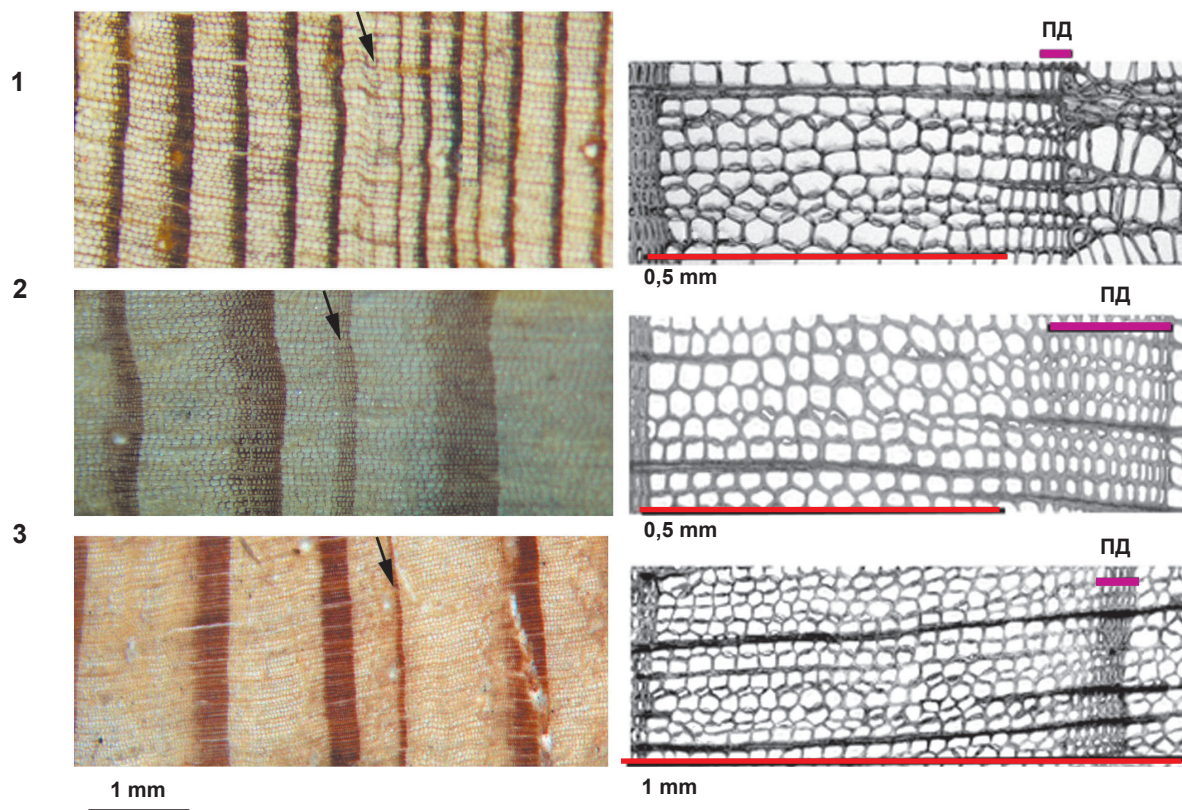


Рис. 2. Типы светлых колец (1–3) в лиственнице, выявленные в 1783 г. (указаны стрелками). ПД – поздняя древесина. Слева – фотографии, справа – схема строения светлых колец

Fig. 2. Type of light annual rings (1–3) in larches revealed in 1783 (indicated by arrows). ПД (LD): latewood zone, horizontal lines mark the latewood width. On the left: photographs, on the right: light-ring structure diagram

наиболее типичных трахеид от внутренней границы кольца к внешней, и в этих рядах были измерены толщина двойной клеточной стенки, продольный и поперечный диаметры люмена трахеид, доля поздней древесины от ширины годичного кольца. Измерения проводились по стандартной методике, подробное описание которой приведено в [28]. Эти данные были использованы для классификации светлых колец.

Карты распределения светлых колец были построены в программном обеспечении ArcGIS 9.0 с использованием метода площадной интерполяции. Данные по светлым кольцам наносились на карту с шагом 10%.

Результаты исследования

Длина построенных древесно-кольцевых хронологий составила от 367 до 591 года. В базе данных оказалось всего 247 и 246 годичных колец соответственно на северном и южном профилях, представляющих 1783 г. Из 493 колец этого года 253 имели измененную структуру поздней древесины, которую можно идентифицировать как светлое кольцо. На северном профиле выявлено на 27 светлых колец больше (140 шт., 57% общего числа колец на северном профиле), чем на южном

профиле (113 шт., 46% общего числа колец на южном профиле).

Выявленное разнообразие строения светлых колец в 1783 г. может быть объединено в следующие основные структурные типы:

- **Тип 1.** Светлые кольца с очень узкой зоной поздней древесины, состоящей из 1–3 слоев поздних трахеид с тонкими вторичными стенками. Поэтому граница между кольцами роста слаборазличима. Количество клеток зоны поздней древесины (для данного типа светлых колец зона поздней древесины определялась как трахеиды, у которых радиальный размер в два раза меньше тангенциального) составляет 12–20% общего количества клеток. Площадь клеточной стенки поздней древесины не светлых колец в два-три раза больше, чем у светлых колец. Площадь люмена в зоне поздней древесины уменьшается по сравнению с предыдущими не светлыми кольцами (рис. 2.1).
- **Тип 2.** Светлые кольца этого типа относительно широкие. Доля клеток в зоне поздней древесины сопоставима с таковыми у не светлых колец (30% общего числа трахеид), но их клеточные стенки тоньше, а клетки поздней древесины имеют крупные люмены, радиальный размер которых больше, чем у трахеид не светлых колец. Максимальное

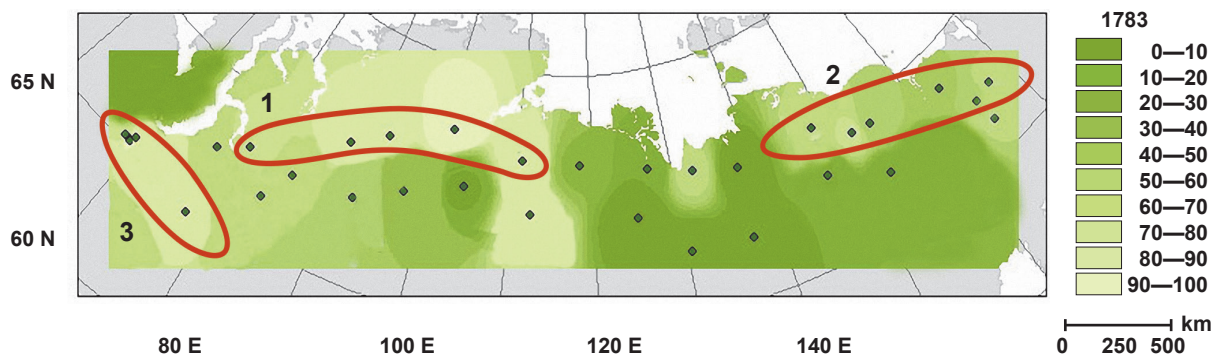


Рис. 3. Пространственное распределение структурных типов светлых колец (1–3). Более светлая окраска указывает на большую долю светлых колец (%). Овалы – регионы со сходным проявлением светлых колец
Fig. 3. Spatial distributions of structural types of light rings (1–3). Lighter color indicates a higher proportion of light rings (%). Ovals are regions with similar manifestation of light ring types

значение площади клеточной стенки находится в средней части светлого кольца (ранняя древесина и переходная зона) и уменьшается в поздней древесине. Иногда в конце зоны поздней древесины площадь клеточной стенки достигает того же значения, что и в зоне ранней древесины (см. рис. 2.2).

- **Тип 3.** Относительно широкие годовичные кольца, характеризующиеся очень узкой зоной поздней древесины, состоящей из 1–3 слоев зрелых толстостенных трахеид. Морфологически светлое кольцо этого типа имеет увеличенную зону ранней древесины и уменьшенную зону поздней древесины по сравнению с несветлым кольцом. Количество клеток зоны поздней древесины (т. е. клеток, радиальный размер которых в два раза меньше тангенциального) составляет менее 30% общего числа трахеид (около 15–25%). Различия между светлыми и несветлыми кольцами отмечены на характеристиках клеток начиная с переходной зоны между ранней и поздней древесиной и в поздней древесине [14]. Трахеиды светлого кольца в переходной зоне имеют относительно большой люмен, а площадь клеточной стенки меньше, чем у несветлого кольца. Однако площадь клеточной стенки и люмена трахеид в зоне поздней древесины имеют тот же размер, что и у несветлых колец (см. рис. 2.3).

Погодные условия, способствующие формированию колец типа 1, чаще всего характеризуются холодным июнем, задержкой начала вегетации на 1–2 недели и очень коротким вегетационным сезоном, длящимся 2–4 недели. В теплый период температура воздуха достаточно высокая, что позволяет камбию отложить несколько рядов клеток, которые сформируют раннюю древесину, затем процесс формирования клеток останавливается за счет заморозков или длительного понижения температуры ниже 8°C. Кроме того, в большинстве случаев наблюдаются летние или ранние осенние заморозки, которые у молодых деревьев могут быть

зафиксированы морозобойными повреждениями [11; 14; 29].

Светлые кольца типа 2 формируются, если в течение вегетационного сезона были холодные периоды продолжительностью не менее 10 дней, когда средняя суточная температура воздуха опускалась ниже 8°C. Июнь часто холодный, и начало вегетации задерживается на 5–10 дней. Летние заморозки редки, но возможны. Кроме того, окончание такого вегетационного сезона наступает раньше средних многолетних значений (в конце июля). В результате в зоне поздней древесины формируются клетки с люменом, по форме сходным с поздней древесиной, но с большей площадью за счет тонких клеточных стенок, сопоставимых с ранней древесиной [14; 30].

Светлые кольца типа 3 чаще всего формируются в годы без задержки начала вегетации и с коротким периодом высокой температуры. Деление камбия и формирование трахеид поздней древесины прерывается холодным периодом, и затем наблюдается возврат теплых дней во второй половине вегетации, что позволяет клеткам поздней древесины созреть. В некоторых случаях формирование светлых колец типа 3 происходит в холодные сухие годы. Недостаток воды во второй половине вегетации ведет к формированию клеток, подобных поздней древесине [31]. Возможно, что в холодные периоды или во время заморозков возможно наступление физиологической засухи, когда подача воды вверх по стволу невозможна не из-за дефицита воды, а из-за низких или повреждающих ксилемным температур.

В 1783 г. в годовичных кольцах деревьев, произрастающих на одном местообитании, формировались светлые кольца разных структурных вариаций. Тем не менее на многих местообитаниях можно было выделить какой-то преобладающий тип светлых колец. Исходя из того, всему местообитанию присваивали такой структурный тип светлых колец, который преобладал. Было отмечено несколько местооби-

таний, где нельзя было установить преобладающий тип светлых колец, так как разные светлые кольца в представленной выборке сформировались в равной пропорции.

Наиболее распространенным вариантом строения светлых колец в 1783 г. на северном профиле в Сибири были кольца типа 1 (52 кольца, 37% общего числа светлых колец на северном профиле). Из них 60% зафиксировано к западу от реки Лена (33 шт.). Затем их количество резко убывает, и на востоке Сибири выявлено много светлых колец типа 2 (58%). На отдельных местообитаниях количество светлых колец превышает 90% выборки (рис. 3).

На южном профиле наиболее частым типом были кольца типа 3, особенно много их отмечено также к западу от Лены (70%). Восточнее на южном профиле преобладали кольца с широкой поздней древесины и широким люменом (тип 2, 74%). На границе между Средней и Восточной Сибирью в 1783 г. светлые кольца почти не были выявлены на обоих профилях.

Обсуждение результатов исследования

Трещинное извержение Лаки было одним из катастрофических событий конца XVIII в. Влияние пыли, газов и аэрозолей от извержения Лаки наблюдалось не только в Европе, но и на территории России. Например, сухой туман Лаки к 30 июня 1783 г. достиг Москвы, а в начале июля — горного Алтая, расположенного в Центральной Азии, примерно в 7000 км от Исландии [32]. Последствия извержения Лаки косвенно отмечены в русских летописях на территории Русской равнины и в Приуралье как сухой туман, заморозки и неурожай [33].

Представляется важным проанализировать экстремальные погодные явления, описанные в 1783—1784 гг. в летописях Тобольского наместничества и Алтая, расположенных южнее в Сибири. Например, в летописях Тобольского наместничества указаны заморозки в начале вегетационного периода в 1783 г. Это говорит о том, что вегетационный период начался рано, но после этого наблюдался возврат холодов. Само лето выдалось в этом регионе неурожайным. Однако причины неурожая в летописях не называются. Это могли быть как заморозки или засуха, так и сухой туман и низкая прозрачность атмосферы [34].

На Алтае в окрестностях Бийска отмечены заморозки в июле и последовавший за этим неурожай. В следующем 1784 г. здесь же зафиксированы заморозки в июле со снегом высотой до 0,5 аршина (35 см) и неурожай. Следует отметить, что заморозки в этот период были нечастыми: в последний раз перед извержением они были описаны в 1773 г. а после упомянуты только в 1788 г. В Тобольске в этом году было сильное наводнение, разрушившее город. Наводнение наступило поздно, 22 мая 1784 г. Вода в Иртыше поднималась на 8 м. Однако эта высота воды не являлась экстремальной для Тоболь-

ска тех лет, и до 7 подобных высоких наводнений зафиксировано в XVIII в. [34]. Таким образом, в течение летнего периода 1783—1784 гг. на территории Сибири, где поселились русские и могли зафиксировать необычные погодные события в летописях, отмечены неблагоприятные природные события, связанные с понижением температуры воздуха.

Не только в Сибири, но и в Китае в 1784—1787 гг. наблюдались необычные природные явления. В летописях того времени зафиксированы данные о голоде, эпидемии и повышенной смертности людей и скота в течение нескольких лет, произошедшие из-за сильной засухи. Начало крупной засухи зафиксировано в северно-восточных регионах Китая в 1784 г., и она постепенно смещалась на юго-восток. Возможно, это связано с усилением Эль-Ниньо — колебания температуры поверхностного слоя воды в экваториальной части Тихого океана [35], а также с погодно-климатическими особенностями в Евразии предшествовавшего 1783 г.

Поиск исторических документов по Северной Америке не выявил никаких наблюдений необычной дымки в этот год [16; 36]. Годичные кольца ели сизой не являются экстремально узкими, но плотность поздней древесины (MXD) самая низкая за последние 400 лет. Следовательно, самое холодное лето на северо-западе Аляски было в 1783 г. Устная история инуитов описывает экстремально холодное лето, вызывающий голод и смерть несколько столетий назад на северо-западе Аляски. Г. К. Якоби и др. [36] уверены, что годичные кольца с экстремально низкой плотностью поздней древесины, а также записанные и устные истории голода и смерти у инуитов взаимосвязаны с извержением Лаки в 1783 г.

В результате даже на расстоянии 7000 км от извержения вулкана происходили неблагоприятные погодные явления, ведущие к ухудшению социально-экономических условий. Они не были экстремальными по сравнению с некоторыми другими годами, но их пространственное распределение свидетельствует о краткосрочных широкомасштабных неблагоприятных климатических изменениях, с большой вероятностью вызванных извержением Лаки.

На уникальность погодных условий вегетационного периода 1783 г. указывают количество и пространственное распределение светлых колец в предыдущие и последующие годы. В течение пяти лет до и после 1783 г. массового повсеместного формирования светлых колец в высоких широтах Сибири не наблюдалось. Нужно отметить, что обычно массовое формирование светлых колец у лиственниц по всей Сибири в один год происходит достаточно редко. За последние 400 лет подобные явления зафиксированы после крупных извержений, например, после извержения вулканов Тамбора или Кракатау, когда наблюдалась серия лет (подряд три года) со светлыми кольцами [12].

Тем не менее в разных географических частях на севере Сибири погодные условия 1783 г. трансфор-

мировались локальными особенностями рельефа, атмосферной циркуляции и другими климатообразующими факторами. Например, в Западной Сибири выявлены светлые кольца с тонким слоем поздней древесины (тип 3). Эти годовые кольца будут наиболее сформированными, а ксилемная ткань наиболее созревшей по сравнению с кольцами этого года у лиственницы из других частей Сибири.

На основе результатов этого исследования и работ Л. Филион и др., А. Витаса, М. А. Гурской [11; 14; 29—31] можно дать следующую интерпретацию погодных условий в Западной Сибири в 1783 г. Период, когда происходит камбиальное деление, был коротким, что привело к формированию небольшого числа клеток годового кольца. После периода камбиального деления и растяжения клеток наступили оптимальные, характерные для средних многолетних значений условия для созревания поздней древесины. Но поскольку всех клеток было мало, зона поздней древесины оказалась узкой. Возможно, наблюдался небольшой дефицит осадков. Реконструкции температуры воздуха, выполненные по ширине и максимальной плотности кольца, показывают, что температуры воздуха в период формирования кольца были низкими, аномалии температуры июня-августа составили до -2°C , а июня-июля — до -5°C [37—39]. Вероятно, наиболее суровые условия были на севере Средней Сибири между Енисеем и Леной. Сокращение периода роста в этот год началось с задержки начала вегетации и с задержкой инициации камбия (обычно наблюдается в июне в этих условиях). Однако в течение нескольких недель в конце июня — начале июля температура воздуха была высокой, выше 14°C , возможно, достигала 20°C . В это время сформировалось широкое годовое кольцо, состоящее из клеток ранней древесины. Период формирования поздней древесины, начинающийся в июле, был сокращен до нескольких дней. С большой вероятностью в северной лесотундре Средней Сибири вегетация была прекращена заморозком в конце июля — начале августа. После этого события процессы формирования и созревания трахеид в кольце остановились. В южной лесотундре в этот период происходило созревание тонкого слоя поздней древесины. Такие погодные условия наблюдались в Средней Сибири до 110° в. д., захватывая плато Путорана. Аномалии средней температуры воздуха вегетационного периода составили от -3°C до -5°C по разным источникам [37; 39].

На территории Восточной Сибири вегетационный период, скорее всего, начинался в сроки, соответствующие средним многолетним значениям. Камбиальное деление и формирование всех клеток прошло при температурах не ниже средних многолетних значений. Но затем формирование стенок поздних трахеид было остановлено холодной погодой, наступившей в конце июля. Могли быть заморозки, но, по-видимому, наблюдалось понижение средней суточной температуры ниже 8°C более 10 дней под-

ряд. Также можно предположить низкую скорость фотосинтеза не только из-за периода низкой температуры, но и из-за облачности и осадков второй половины вегетационного периода.

Реконструкции температуры июня-июля по ширине годового кольца не показывают сильных температурных аномалий в этот год в районе исследования. Вегетационный период не был холодным, и годовые кольца сформировались. Не было зафиксировано выпадений колец, не было отмечено экстремально узких колец, что характерно для холодных вегетационных периодов [37]. Тем не менее особенности анатомического строения колец, особенно на северном профиле, указывают, что процессы и сроки формирования и созревания поздней древесины были существенно укорочены. Следовательно, можно предположить в 1783 г. неблагоприятное завершение вегетационного сезона. В первую очередь это субоптимальные температуры второй половины вегетации (июля-августа), в результате количество клеток поздней древесины сократилось. Местами возможны были заморозки, что резко остановило деление камбия, рост и созревание трахеид. Плотная облачность, снижающая количество поступающей солнечной радиации, существенно снизила поступление энергии для фотосинтеза и запасаания углерода в клеточных стенках трахеид.

Интересно отметить, что реконструкция температуры июня-июля по ширине годовых колец не выявила существенного снижения температуры воздуха в последующее десятилетие. В некоторых районах (например, на Полярном Урале) отмечено локальное понижение температуры после извержения на несколько лет, а в других районах Сибирской Субарктики температура после 1783 г. оставалась около средних многолетних значений в течение 3—5 лет [37; 39].

Полученные в работе результаты согласуются с результатами моделирования особенностей распределения сульфатного аэрозоля после извержения. Пиковые выбросы SO_2 в конце июня составили чуть более 37 Мт, а выбросы аэрозоля H_2SO_4 достигли пика в конце августа 1783 г. и составили 60 Мт. Хотя большая часть сульфатного аэрозоля была удалена из атмосферы осенью и в начале зимы, значительное аэрозольное возмущение сохранялось до 1784 г. [40]. Выбросы аэрозоля изменяют количество поступающей солнечной радиации, отражая или поглощая ее, и способствуют формированию облаков. Следовательно, изменения состава атмосферы могут уменьшить количество приходящей на поверхность земли солнечной радиации [41]. В то же время именно этот период (конец июня — август) является основным для формирования годового кольца у хвойных в высоких широтах. Неудивительно, что в период пикового выброса сернистого аэрозоля в атмосферу нормальное формирование годовых колец нарушается.

Результаты моделирования циркумполярного распределения осаждения серы после данного из-

вержения [42] подтверждают увеличенное осаждение сульфата в Западной Сибири, а также могут объяснять различие в преобладании разных типов светлых колец в исследованном регионе.

Несмотря на холодное и короткое лето в Сибири, в Западной Европе было отмечено очень теплое лето. Возможно, теплое лето 1783 г. было результатом атмосферного блокирования над Северной Европой [43]. Блокирование привело к снижению переноса теплых воздушных масс с запада на восток и нагреву территории над Европой, с одной стороны, и поспособствовало вторжению полярных холодных воздушных масс в Сибирь — с другой. Последствия атмосферного блокирования проявились в северном Китае, где произошло усиление влияния Эль-Ниньо в последующие годы.

В настоящее время сложно провести экстраполяцию последствий подобных трещинных извержений исландских вулканов на всю экосистему Сибирской Субарктики только на основе светлых годичных колец у лиственницы. Весьма вероятно, что без дополнительных факторов, например, в виде атмосферного блокирования, отрицательной фазы Североатлантического колебания, положительной фазы Арктической осцилляции, подобной Эль-Ниньо, трещинное извержение не может оказывать такое повсеместное воздействие на экосистемы высоких широт Сибири. Крупное извержение с большим количеством выбросов сернистых газов и сульфатного аэрозоля, с одной стороны, и процессы атмосферного блокирования, возможно, развивавшиеся независимо от извержения, — с другой, привели к формированию уникальных погодных условий, зафиксированных в светлых кольцах лиственницы в высоких широтах Сибири в 1783 г. [35; 44; 45].

Заключение

На основании обобщения косвенных данных о погодных условиях 1783 г., моделирования пространственного распределения аэрозольного сульфата и проявления светлых колец в древесине лиственницы можно заключить, что извержение исландского вулкана Лаки 1783—1784 гг. было одним из самых примечательных высокоширотных трещинных извержений за последние 400 лет и оказало существенное воздействие на окружающую среду и климат. В высоких широтах Сибири повсеместно наблюдалось формирование светлых годичных колец — колец с изменениями в структуре поздней древесины. Чаше эти структурные изменения были выявлены на северном пределе распространения лиственницы. У лиственницы, произрастающей на границе с тайгой, проявления светлых годичных колец были отмечены реже. Погодные условия в высоких широтах Сибири в период вегетации 1783 г. характеризовались неблагоприятным вегетационным сезоном, жарким началом летнего периода, прерываемым заморозками в середине или во второй половине вегетации. Подобные извержения в будущем могут наносить существенный ущерб

хозяйственно-экономической деятельности человека в результате аномального протекания вегетационного периода, понижения температуры воздуха в течение вегетации в циркумполярной области и формирования атмосферного блокирования.

Финансирование

Исследование выполнено за счет государственного задания Института экологии растений и животных Уральского отделения РАН «Древесно-кольцевые хронологии в разработке фундаментальных и прикладных экологических проблем Урала и Сибири» № 122021000093-6.

Благодарность

Автор выражает признательность члену Международной дендрохронологической экспедиции 1992 г. в рамках Сибирского субарктического проекта доктору биологических наук В. С. Мазепе за предоставление части собранного материала.

Литература/References

1. Sigl M., Winstrup M., McConnell J. R., Welten K. C. et al. Timing and climate forcing of volcanic eruptions for the past 2,500 years. *Nature*, 2015, vol. 523, no. 7562, pp. 543—549. Available at: <https://doi.org/10.1038/nature14565>.
2. Robock A. Volcanic eruptions and climate. *Reviews of geophysics*, 2000, vol. 38, no. 2, pp. 191—219. Available at: <https://doi.org/10.1029/1998RG000054>.
3. Schneider D. P., Ammann C. M., Otto-Bliesner B. L., Kaufman D. S. Climate response to large, high-latitude and low-latitude volcanic eruptions in the Community Climate System Model. *J. of Geophysical Research: Atmospheres*, 2009, vol. 114, iss. D15. Available at: <https://doi.org/10.1029/2008JD011222>.
4. Sigl M., McConnell J. R., Layman L. et al. A new bipolar ice core record of volcanism from WAIS Divide and NEEM and implications for climate forcing of the last 2000 years. *J. of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, vol. 118, no. 3, pp. 1151—1169. Available at: <https://doi.org/10.1029/2012JD018603>.
5. Crowley T. J., Quinn T. M., Taylor F. W. et al. Evidence for a volcanic cooling signal in a 335-year coral record from New Caledonia. *Paleoceanography*, 1997, vol. 12, iss. 5, pp. 633—639. Available at: <https://doi.org/10.1029/97PA01348>.
6. D'Arrigo R. D., Jacoby G. C. Northern North American tree-ring evidence for regional temperature changes after major volcanic events. *Climatic Change*, 1999, vol. 41, no. 1, pp. 1—15. Available at: <https://doi.org/10.1023/A:1005370210796>.
7. Шиятов С. Г. Дендрохронология верхней границы леса на Урале. — М.: Наука, 1986. — 136 с. Shiyatov S. G. Dendrochronology of the upper forest boundary in the Urals. Moscow, Nauka, 1986, 136 p. (In Russian).
8. Briffa K. R., Jones P. D., Schweingruber F. H., Osborn T. J. Influence of volcanic eruptions on Northern Hemi-

- sphere summer temperature over the past 600 years. *Nature*, 1998, vol. 393, no. 6684, pp. 450—455. Available at: <https://doi.org/10.1038/30943>.
9. Battipaglia G., Cherubini P., Saurer M. [et al]. Volcanic explosive eruptions of the Vesuvio decrease tree-ring growth but not photosynthetic rates in the surrounding forests. *Global Change Biology*, 2007, vol. 13, no. 6, pp. 1122—1137. Available at: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2007.01350.x>.
10. Anchukaitis K. J., Breitenmoser P., Briffa K. R. [et al]. Tree rings and volcanic cooling. *Nature Geoscience*, 2012, vol. 5, no. 12, pp. 836—837. Available at: <https://doi.org/10.1038/ngeo1645>.
11. Fillion L., Payette S., Gauthier L., Boutin Y. Light rings in subarctic conifers as a dendrochronological tool. *Quaternary Research*, 1986, vol. 26, no. 2, pp. 272—279. Available at: [https://doi.org/10.1016/0033-5894\(86\)90111-0](https://doi.org/10.1016/0033-5894(86)90111-0).
12. Gurskaya M. A. Use of larch light rings for an evaluation of volcanic explosivity index. *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*, 2018, vol. 53, pp. 769—780. Available at: <https://doi.org/10.1134/S0001433817080060>.
13. Hantemirov R., Gorlanova L., Bessonova V. [et al]. A 4500-Year Tree-Ring Record of Extreme Climatic Events on the Yamal Peninsula. *Forest*, 2023, vol. 14, no. 3, p. 574. Available at: <https://doi.org/10.3390/f14030574>.
14. Гурская М. А., Бенкова В. Е. Типы светлых колец у *Larix sibirica* и *L. gmelinii* на верхней границе леса в Урало-Сибирской Субарктике // Ботан. журн. — 2013. — Т. 98, № 8. — С. 1037—1054.
Gurskaya M. A., Benkova V. E. Types of light rings in *Larix sibirica* and *L. gmelinii* at the upper forest boundary in the Ural-Siberian Subarctic. *Botanical J.*, 2013, vol. 98, no. 8, pp. 1037—1054. (In Russian).
15. Wang F., Arseneault D., Boucher É. [et al]. Temperature sensitivity of blue intensity, maximum latewood density, and ring width data of living black spruce trees in the eastern Canadian taiga. *Dendrochronologia*, 2020, vol. 64, p. 125771. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2020.125771>.
16. Stothers R. B. The great fog of 1783. *Climatic change*, 1996, vol. 32, pp. 79—89. Available at: <https://doi.org/10.1007/BF00141279>.
17. Thordarson T., Self S. Atmospheric and environmental effects of the 1783—1784 Laki eruption: A review and reassessment. *J. of Geophysical Research: Atmospheres*, 2003, vol. 108, iss. D1, p. AAC-7. Available at: <https://doi.org/10.1029/2001JD002042>.
18. Grattan J. P., Pyatt F. B. Volcanic eruptions dry fogs and the European palaeoenvironmental record: localised phenomena or hemispheric impacts? *Glob Planet Change*, 1999, vol. 2, pp. 173—179. Available at: [https://doi.org/10.1016/S0921-8181\(99\)00013-2](https://doi.org/10.1016/S0921-8181(99)00013-2).
19. Wieners C. E., Hálfdanarson G. “More poison than words can describe”: what did people die of after the 1783 Laki eruption in Iceland? *Natural Hazards Earth System Sciences*, 2024, iss. 24, pp. 2971—2994. Available at: <https://doi.org/10.5194/nhess-24-2971-2024>.
20. Hellman G. The Laki volcanic eruption of 1783—1784: a reappraisal and reinterpretation of the consequences of the event in Europe. Villain or fall guy? Doctoral dissertation, Université Rennes 2, 2021, 543 p.
21. Witham S., Oppenheimer C. Mortality in England during the 1783—4 Laki Craters eruption. *Bull. of Volcanology*, 2004, vol. 67, pp. 15—26. Available at: <https://doi.org/10.1007/s00445-004-0357-7>.
22. Auker M. R., Sparks R. S. J., Siebert L., Croweller H. S., Ewert J. A statistical analysis of the global historical volcanic fatalities record. *J. of Applied Volcanology*, 2013, vol. 2, no. 1, pp. 1—24. Available at: <https://doi.org/10.1186/2191-5040-2-2>.
23. Newhall C. A., Self S. The volcanic explosivity index (VEI): an estimate of the explosive magnitude for historical volcanism. *J. of Geophysical Research*, 1982, vol. 87, pp. 1231—1238. Available at: <https://doi.org/10.1029/JC087iC02p01231>.
24. Siebert L., Simkin T., Kimberly P. *Volcanoes of the World*. [S. l.], University of California Press, 2011. — 550 p.
25. The Smithsonian Institution's Global Volcanism Program. Available at: <http://volcano.si.edu>.
26. Голубчиков Ю. Н. География горных и полярных территорий. — М.: Изд-во МГУ, 1996. — 304 с.
Golubchikov Yu. N. *Geography of mountain and polar countries*. Moscow, Moscow Univ. Press, 1996, 304 p. (In Russian).
27. Stokes M. A. *An introduction to tree-ring dating*. Chicago, University of Chicago, 1996, 73 p.
28. Ваганов Е. А., Шашкин А. В., Сви́дерская И. В., Высоцкая Л. Г. Гистометрический анализ роста древесных растений. — Новосибирск: Новосиб. отд-ние изд-ва «Наука», 1985. — 105 с.
Vaganov E. A., Shashkin A. V., Sviderskaya L. V., Vysotskaya L. G. *Histometric analysis of woody plant growth*. Novosibirsk, Nauka, 1985, 105 p. (In Russian).
29. Gurskaya M. A. Effect of summer monthly temperatures on light tree ring formation in three larch species (*Larix*) in the northern forest-tundra of Siberia. *Russian J. of Ecology*, 2019, no. 50, pp. 343—351. Available at: <https://doi.org/10.1134/S1067413619040088>.
30. Gurskaya M. A., Hallinger M., Eckstein D., Wilmking M. Extreme cold summers in western Siberia, concluded from light-rings in the wood of conifers. *Phyton (Horn)*, 2012, vol. 52, no. 1, pp. 101—119.
31. Vitas A. Climatically induced light rings of European larch (*Larix decidua* Mill.) in Lithuania. *Trees*, 2018, vol. 32, no. 3, pp. 791—800. Available at: <https://doi.org/10.1007/s00468-018-1672-5>.
32. Grattan J., Brayshay M., Sadler J. Modelling the distal impacts of past volcanic gas emissions. Evidence of Europe-wide environmental impacts from gases emitted during the eruption of Italian and Icelandic volcanoes in 1783 [Vers la modélisation des impacts distaux des gaz d'anciennes éruptions volcaniques.

- Exemples européens liés à l'activité de volcans italiens et islandais en 1783]. *Quaternaire*, 1998, vol. 9, no. 1, pp. 25—35.
33. Борисенков Е. П., Пасецкий В. М. Летопись необычайных явлений природы за 2,5 тысячелетия. — Л.: Гидрометеиздат, 2003. — 536 с.
- Borisenkov Ye. P., Pasetskiy V. M. Chronicle of extraordinary natural phenomena over 2.5 millennia. Leningrad, Gidrometeoizdat, 2003, 536 p. (In Russian).*
34. Мыглан В. С. Климат и социум Сибири в малый ледниковый период. — Красноярск: СФУ, 2010. — 230 с.
- Myglan V. S. Climate and society of Siberia during the Little Ice Age. Krasnoyarsk, SSU, 2010, 230 p. (In Russian).*
35. Hang X., Sun Z., He J. [et al]. Temporal and Spatial Effects of Extreme Drought Events on Human Epidemics over Ancient China in 1784—1787 CE. *Environmental Health*, 2025, 24 (1), pp. 1—16. Available at: <https://doi.org/10.1186/s12940-025-01163-w>.
36. Jacoby G. C., Workman K. W., D'Arrigo R. D. Laki eruption of 1783, tree rings, and disaster for north-west Alaska Inuit. *Quaternary Science Reviews*, 1999, vol. 18, no. 12, pp. 1365—1371.
37. Ваганов Е. А., Шиятов С. Г., Мазепа В. С. Дендроклиматические исследования в Урало-Сибирской субарктике. — Новосибирск: Новосиб. филиал Федер. гос. унитар. предприятия «Академ. науч.-издат. и книгораспространит. центр «Наука», 1996. — 246 с.
- Vaganov Ye. A., Shiyatov S. G., Mazepa V. S. Dendroclimatic studies in the Ural-Siberian subarctic. Novosibirsk, Novosibirsk branch of the Federal State Unitary Enterprise "Academic Scientific Publishing and Book Distribution Center "Nauka", 1996, 246 p. (In Russian).*
38. Edwards J., Anchukaitis K. J., Zambri B. [et al]. Intra-annual climate anomalies in northwestern North America following the 1783—1784 CE Laki eruption. *J. of Geophysical Research: Atmospheres*, 2021, vol. 126, iss. 3, p. e2020JD033544. Available at: <https://doi.org/10.1029/2020JD033544>.
39. Клименко В. В., Мацковский В. В., Дальманн Д. Комплексная реконструкция температуры российской Арктики за последние два тысячелетия // Арктика: экология и экономика. — 2013. — Т. 4, № 12. — С. 84—95.
- Klimenko V. V., Matskovsky V. V., Dahlmann D. Comprehensive reconstruction of the temperature of the Russian Arctic over the past two millennia. Arctic: Ecology and Economy, 2013, vol. 4, no. 12, pp. 84—95. (In Russian).*
40. Oman L., Robock A., Stenchikov G. L. [et al]. Modeling the distribution of the volcanic aerosol cloud from the 1783—1784 Laki eruption. *J. of Geophysical Research: Atmospheres*, 2006, vol. 111, no. D12. Available at: <https://doi.org/10.1029/2005JD006899>.
41. Тимофеев Ю. М. Исследования атмосферы Земли методом прозрачности. — СПб.: Наука, 2016. — 367 с.
- Timofeev Yu. M. Studies of the Earth's atmosphere using the transparency method. St. Petersburg, Nauka, 2016, 367 p. (In Russian).*
42. Stevenson D. S., Johnson C. E., Highwood E. J. [et al]. Atmospheric impact of the 1783—1784 Laki eruption. Part I: Chemistry modelling. *Atmospheric chemistry and physics*, 2003, vol. 3, no. 3, pp. 487—507. Available at: <https://doi.org/10.5194/acp-3-487-2003>.
43. Zambri B., Robock A., Mills M. J., Schmidt A. Modeling the 1783—1784 Laki eruption in Iceland: 2. Climate impacts. *J. of Geophysical Research: Atmospheres*, 2019, vol. 124, no. 13, pp. 6770—6790. Available at: <https://doi.org/10.1029/2018JD029554>.
44. Shindell D. T., Schmidt G. A., Mann M. E., Faluvegi G. Dynamic winter climate response to large tropical volcanic eruptions since 1600. *J. of Geophysical Research: Atmospheres*, 2004, vol. 109, iss. D5. Available at: <http://doi.org/10.1029/2003JD004151>.
45. Гурская М. А. Влияние атмосферной циркуляции на формирование светлых колец в древесине лиственницы в Сибирской Субарктике // Журн. Сибир. федер. ун-та. Биология. — 2022. — Т. 15, № 2. — С. 167—182. — URL: <http://doi.org/10.17516/1997-1389-0381>.
- Gurskaya M. A. Influence of atmospheric circulation on the formation of light rings in larch wood in the Siberian Subarctic. Journal of the Siberian Federal University. Biology, 2022, vol. 15, no. 2, pp. 167—182. Available at: <http://doi.org/10.17516/1997-1389-0381>. (In English).*

Информация об авторе

Гурская Марина Анатольевна, доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник, Институт экологии растений и животных Уральского отделения РАН (620144, Россия, Екатеринбург, ул. 8 Марта, д. 202), e-mail: mgurskaya@yandex.ru.

EVIDENCE OF THE 1783 LAKI ERUPTION IN LIGHT ANNUAL RINGS OF LARCH FROM HIGH LATITUDES OF SIBERIA

Gurskaya, M. A.

Institute of Plant and Animal Ecology, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (Ekaterinburg, Russian Federation)

The article was received on January 14, 2025

For citing

Gurskaya M. A. Evidence of the 1783 Laki eruption in light annual rings of larch from high latitudes of Siberia. Arctic: Ecology and Economy, 2025, vol. 15, no. 2, pp. 265—276. DOI: 10.25283/2223-4594-2025-2-265-276. (In Russian).

Abstract

The eruption of the Laki volcano in 1783 had a significant impact on climate, human society and biota of Europe. For the first time, the author analyzed data on adverse events of the summer period of 1783 based on changes in the anatomical structure of annual rings of larches growing in the high latitudes of Siberia. Cores of northern larches were collected at 32 sites along a 4000 km long forest-tundra transect. In 1783 tree rings with abnormal anatomical structure of latewood — so called light rings — were formed on the trees at almost every site. Based on the light rings, the author considered weather features of the vegetation period in the high latitudes of Siberia and identified areas with a similar distribution of adverse weather events. The obtained knowledge of the influence of large volcanic eruptions in Iceland on the climate of the Siberian forest tundra makes it possible to assess the potential effects of future similar large eruptions on the biota and human socio-economic activity in the high latitudes of Siberia.

Keywords: *volcanoes, climate change, larch, light annual rings, high latitudes of Siberia.*

Funding

The IPAE UD RAS supported the research within the state assignment “Tree-ring chronologies in the development of fundamental and applied environmental problems of the Urals and Siberia” No. 122021000093-6.

Acknowledgements

The author expresses gratitude to the member of the International Dendrochronological Expedition of 1992 within the framework of the Siberian Subarctic Project, Doctor of Biological Sciences V. S. Mazepa for providing part of the collected material.

Information about the author

Gurskaya, Marina Anatol'evna, Doctor of Biological Sciences, Leading Researcher, Institute of Plant and Animal Ecology, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (202, 8 Marta St., Ekaterinburg, Russia, 620144), e-mail: mgurskaya@yandex.ru.

© Gurskaya M. A., 2025