

УДК 551.21.032:630*561.24(212.3:571.1/5)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СВЕТЛЫХ КОЛЕЦ ЛИСТВЕННИЦЫ ДЛЯ ОЦЕНКИ ИНДЕКСА ВУЛКАНИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ

© 2017 г. М.А. Гурская

Институт экологии растений и животных УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

Извержения вулканов ведут к глобальному краткосрочному понижению температуры воздуха и в том числе к укорочению вегетационного сезона. Реакцией на эти краткосрочные климатические изменения является формирование светлых колец в древесине лиственницы, произрастающей в сибирской лесотундре. На основе анализа кернов лиственницы, собранных на 18 точках, показаны связи между массовым формированием светлых колец и индексом вулканической активности (VEI), а также между пространственным распространением светлых колец и VEI.

Ключевые слова: сибирская лесотундра, лиственница, светлые кольца, извержения вулканов, VEI.

PACS 91.40-k

Введение

Вулканические извержения – одно из распространенных катастрофических природных явлений. Мощные эксплозивные извержения оказывают негативное влияние на экосистемы, нарушают жизнь общества. В результате извержения в атмосферу выбрасывается огромное количество вулканического обломочного материала. Для оценки количества выбросов обломочного материала предложен индекс вулканической активности, или индекс эксплозивности вулкана (volcanic explosivity index, VEI). На основе этого индекса выработана шкала извержений, изменяющаяся от 0 до 8 [Newhall, Self, 1982]. Этот индекс объединяет в себе такие показатели, как объем выброшенного материала (газы, аэрозоли, пепел, пыль, крупные куски тефры), высота столба пепла и эксплозивность извержения. Вулканы с $VEI > 5$ выбрасывают более 1 км^3 породы, а с $VEI = 8$ – более 1000 км^3 пыли и пепла.

Некоторые крупные исторические эксплозивные извержения с $VEI \geq 5$ и их воздействие на социально-экономическую активность человека описаны в летописях. Кроме исторических записей вулканических извержений, существуют и другие, природные,

свидетельства. В природе следы прошлых крупных извержений фиксируются в ледовых ядрах [Dai et al., 1991; Kurbatov et al., 2006; Gao et al., 2008; Sigl et al., 2013], кораллах [Crowley et al., 1997] и в годичных кольцах долгоживущих деревьев [LaMarche, Hirschboeck, 1984; Jones et al., 1995; Ваганов и др., 1996; Briffa et al., 1998; Salzer, Hughes, 2007; Esper et al., 2013].

Изменения в климате проявляются в годы, следующие после извержений вулканов. Высокоексплозивные извержения вулканов ведут к существенному понижению температуры воздуха как в глобальном, так и в региональном масштабе, обусловленному в первую очередь снижением приходящей солнечной радиации [Robock, 2000]. Поток солнечной энергии отражается от выброшенных в воздух мелких частиц (вулканический пепел и пыль), а также от газов (в основном SO₂ и CO₂) и аэрозолей. Основные климатические последствия извержений вулканов описываются как последующие похолодания климата в течение серии лет [Schneider et al., 2009; D'Arrigo et al., 2013].

Кроме глобального понижения летней температуры воздуха на 0.7–1.8 °С в последующие год–два [Sigl et al., 2015], последствия извержений вулканов проявляются в виде необычайных погодных явлений и климатических экстремумов: летние заморозки, экстремально короткое/холодное лето и сухой туман в течение вегетации [LaMarche, Hirschboeck, 1984; Stothers, 1999; D'Arrigo et al., 2009].

В экстремальных условиях произрастания деревьев на пределе их ареалов незначительные изменения фактора, лимитирующего прирост деревьев, вызывают сильную ответную реакцию, которая легко может быть выявлена в виде различных изменений в приросте: изменение ширины годичного кольца, плотности древесины, изотопного состава, анатомического строения кольца [Fritts, 1976; Ваганов и др., 1996; Schweingruber, 2007].

Один из вариантов изменений анатомического строения слоя прироста – светлые кольца, которые представляют собой годичные кольца с более светлоокрашенной зоной поздней древесины по сравнению с прилегающими кольцами [Kaennel, Schweingruber, 1996]. Светлая окраска обусловлена морфо-анатомическими изменениями строения поздней древесины. Чаще всего это выражается в тонких стенках поздних трахеид, сопоставимых по толщине со стенками клеток ранней древесины. Другой вариант строения светлых колец – это кольца с очень узкой зоной поздней древесины или совсем без нее [Гурская, Бенькова, 2013].

В общих чертах, формирование светлых колец происходит либо за счет снижения интенсивности фотосинтеза и последующего изменения скорости метаболизма целлюлозы, гемицеллюлозы и лигнина, формирующих стенки трахеид, либо за счет преждевременного прекращения камбиальной активности, ведущего к уменьшению ширины зоны поздней древесины [Gurskaya et al., 2012; Гурская, Бенькова, 2013]. «Спусковым крючком» этих механизмов на северных пределах распространения хвойных деревьев является понижение температуры воздуха в определенные периоды вегетации до некоторых пороговых значений и ниже [Filion et al., 1986; Yamaguchi et al., 1993; Гурская, Агафонов, 2013]. Следовательно, светлые кольца древесины деревьев являются маркером таких экстремальных погодных и климатических явлений, как холодное лето и короткое лето.

В данной работе проанализированы связи между значениями VEI и пространственно-временным распределением светлых колец и интенсивностью их формирования в хвойных деревьях на примере большого региона – северной лесотундры в Сибири.

Характеристика района исследования

Район исследования представляет собой северную часть лесотундрового биома Сибири. Характерными признаками этого биома являются: невысокие температуры самого жаркого месяца – июля (около 12–14 °С); небольшое годовое количество осадков – 250–350 мм; низкое испарение, что ведет к заболачиванию понижений рельефа; наличие многолетнемерзлых пород; бедные торфяно-глеевые или торфяно-подзолистые почвы; короткий вегетационный сезон – 6–10 недель [Западная Сибирь..., 1963; Средняя Сибирь..., 1965; Якутия..., 1965].

Уменьшение количества осадков и увеличение континентальности климата с продвижением с запада на восток ведет к изменению видового состава лиственниц. В Западной Сибири лиственница сибирская (*Larix sibirica* Ledeb.) произрастает совместно с елью сибирской (*Picea obovata* Ledeb.), тогда как в Средней Сибири встречается лиственница Гмелина (*L. gmelinii* (Rupr.) Rupr.), а еще восточнее – лиственница Каяндера (*L. cajanderi* Mayr) [Абаимов, 1997]. В результате суровых климатических условий здесь формируются лиственничные редколесья и редины с сомкнутостью крон 0.1.

Исходные данные

Буровые образцы (керны) из разных видов лиственницы собраны на меридиональном профиле в северной лесотундре на 18 точках, находящихся на расстоянии 250–500 км друг от друга (рис. 1). На каждой точке собрано по 20–50 кернов лиственницы (табл. 1). Поверхность кернов тщательно зачищалась, измерялась ширина годовичных колец, и на основе этих данных образцы перекрестно датировались с использованием программ TSAP [Rinn, 1996] и COFESHA [Holmes, 1983]. Длина полученных древесно-кольцевых хронологий колеблется от 69 до 690 лет, составляя в среднем 450 лет. Большинство хронологий начинается в период с 1550 г., и только хронологии на северо-востоке Сибири были длиннее 500 лет.

Светлые кольца выявлялись визуально под микроскопом с увеличением $\times 10$ –20. Несмотря на существующую вариативность их анатомического строения, все варианты светлых колец рассматривались как единая структура (рис. 2).

Для каждой точки сбора материала были построены точечные хронологии светлых колец. Для этого определялось общее количество годовичных колец для каждого года и рассчитывался процент количества светлых колец в этот год. Во избежание завышения

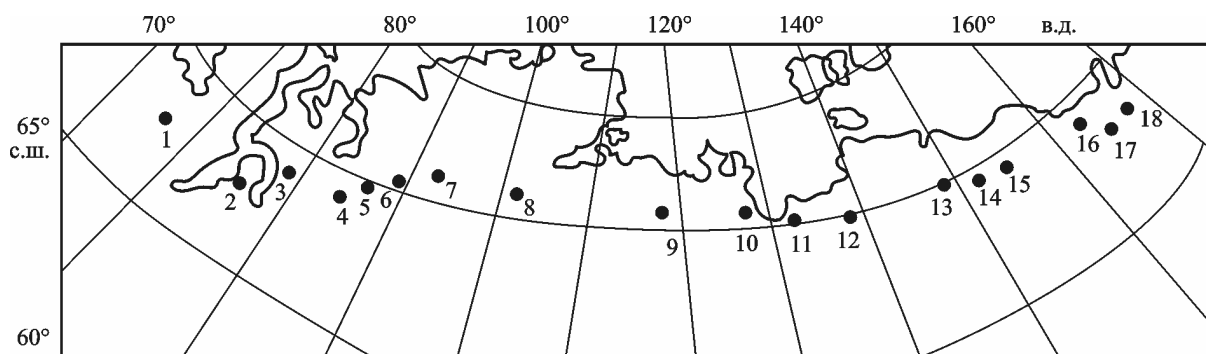


Рис. 1. Карта-схема района исследования
Точки – места сбора образцов

Таблица 1. Характеристики точек сбора образцов

№ точки	Координаты, град.		Высота, м над ур. моря	Влажность почвы	Вид лиственницы
	с.ш.	в.д.			
1	67°33′	67°32′	35	Свежая	L.s.
2	67°28′	76°46′	20	Сырая	L.s.
3	68°08′	79°46′	30	Сырая	L.s.
4	68°07′	85°03′	50	Свежая	L.s.
5	69°23′	86°13′	20	Свежая	L.s.
6	70°31′	89°30′	70	Свежая	L.s.
7	71°20′	93°50′	70	Свежая	L.g.
8	72°27′	101°45′	20	Свежая	L.g.
9	71°42′	118°35′	80	Свежая	L.g.
10	71°06′	127°17′	70	Свежая	L.c.
11	70°57′	132°59′	20	Свежая	L.c.
12	70°15′	138°10′	80	Свежая	L.c.
13	70°30′	148°08′	20	Свежая	L.c.
14	69°28′	152°06′	30	Свежая	L.c.
15	69°17′	154°46′	50	Свежая	L.c.
16	68°48′	163°03′	300	Свежая	L.c.
17	67°12′	165°06′	470	Сухая	L.c.
18	67°28′	167°40′	450	Сухая	L.c.

Примечания. L.s. – *Larix sibirica*; L.g. – *L. gmelinii*; L.c. – *L. cajanderi*. Положение точек см. на рис. 1

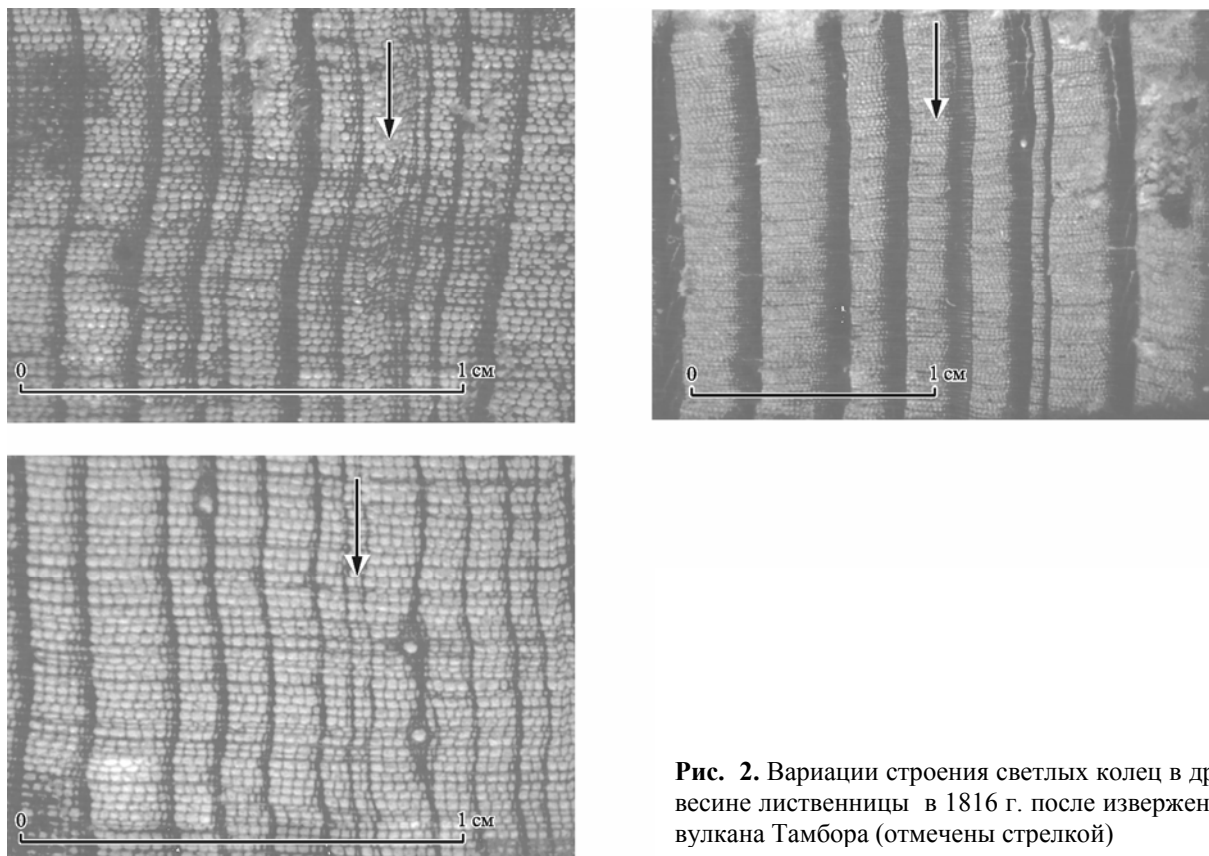


Рис. 2. Вариации строения светлых колец в древесине лиственницы в 1816 г. после извержения вулкана Тамбора (отмечены стрелкой)

результатов из-за уменьшения выборки колец в начале древесно-кольцевых хронологий часть хронологий, поддержанная менее чем десятью годовичными кольцами, нами в расчет не принималась. Все точечные хронологии по светлым кольцам были объединены простым арифметическим осреднением в одну обобщенную хронологию. Для дальнейшего анализа были взяты образцы за те годы, когда количество светлых колец превышало среднее арифметическое значение на одно среднее квадратичное отклонение, а остальные значения были исключены (рис. 3). Это позволило выбрать годы с действительно экстремально высоким количеством светлых колец в древесине лиственницы и построить «хронологию массового формирования светлых колец».

Для построения пространственной хронологии по светлым кольцам в древесине лиственницы для территории Сибирской Субарктики у каждой точечной хронологии исключили годы, где количество светлых колец было менее 10 % (1 случай на 10 и более колец), так как в этом случае сложно утверждать, что реакция годовичных колец имела общий (климатический) характер (сигнал). Затем была рассчитана доля местообитаний от общего числа проанализированных точек, на которых проявился сигнал в виде светлых колец (рис. 4).

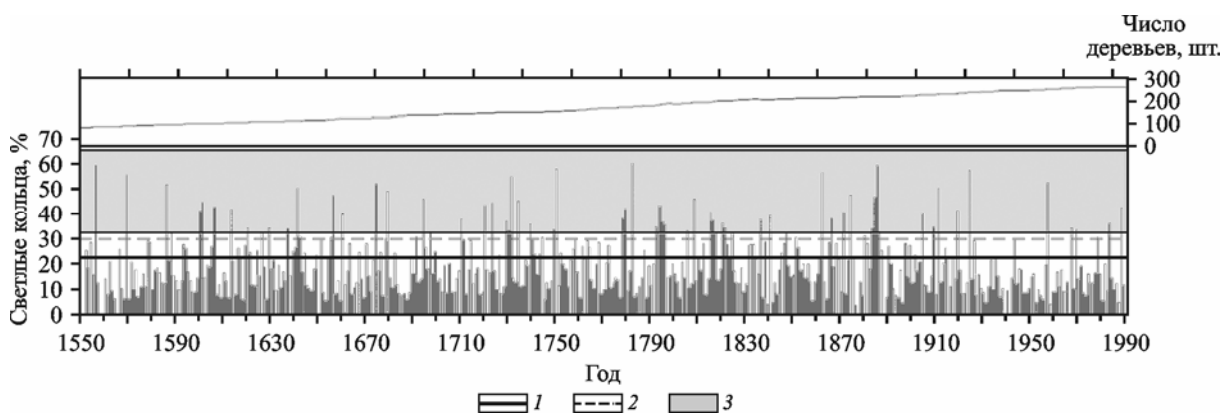


Рис. 3. Обобщенная хронология светлых колец в древесине лиственницы, произрастающей в сибирской лесотундре

1 – среднее значение количества светлых колец; 2 – стандартное отклонение; 3 – использованные данные для построения хронологии по массовому формированию светлых колец

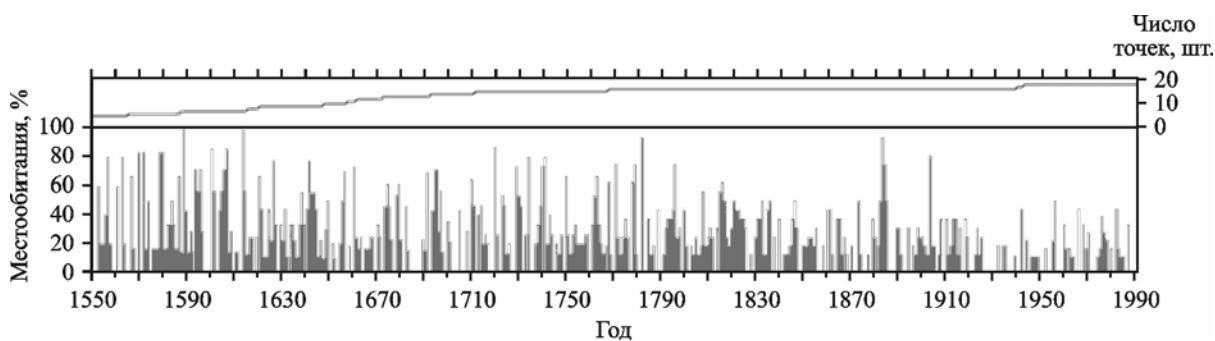


Рис. 4. Пространственная хронология (процент местообитаний, на которых выявлены светлые кольца) по светлым кольцам в древесине лиственницы, произрастающей в сибирской лесотундре

Методы исследования

Были проанализированы извержения вулканов за период 1550–1992 гг. и выбраны извержения с индексом вулканической активности $VEI \geq 4$, а именно с $VEI = 7, 6, 5$ и 4 . В ходе дальнейшего статистического анализа выбранные VEI были использованы в качестве группирующей переменной как для анализа обобщенной хронологии массового формирования светлых колец, так и для анализа пространственной хронологии. Сопоставление лет формирования светлых колец и извержений вулканов проводили следующим образом: если извержение вулкана было в период с января по март текущего года, то для анализа использовали значения количества светлых колец текущего года. Если светлых колец в этот год не было, то брали значения следующего года. Если извержение происходило в апреле и позже, то использовали данные последующего года. Если извержение оказывало долговременное (непрерывно в течение несколько лет) влияние на окружающую среду, то выбирали ближайший к извержению год, а остальные исключали.

Из-за малого количества лет с $VEI = 7, 6$ и 5 для сравнения данных использовали методы непараметрической статистики (U -критерий попарного сравнения независимых переменных Манна–Уитни как аналог параметрического t -теста и H -критерий Краскела–Уоллиса и тест медианы как аналог параметрического теста ANOVA). Годы с $VEI = 7$ и 6 были объединены в одну группу, так как извержение с индексом 7 было отмечено 1 раз.

Полученные результаты

В результате анализа данных по извержению вулканов [Siebert *et al.*, 2010; <http://www.bgs.ac.uk/vogripa>, <http://www.volcano.si.edu>] получено, что за период 1550–1992 гг. было одно извержение с $VEI = 7$ (Тамбора, 1815 г.) и семь извержений с $VEI = 6$ (Билли Митчелл, 1580 г.; Хуаунапутина, 1600 г.; Лонг-Айленд, 1646 ± 12 лет; Кракатау, 1883 г.; Санта-Мария, 1902 г.; Новарупта, 1912 г.; Пинатубо, 1991 г.). Однако извержение вулкана Пинатубо представлено небольшим количеством местообитаний, так как большинство хронологий заканчивалось 1991 г., и его анализ иногда выполнялся отдельно. Извержений с $VEI = 5$ выявлено 23, с сомнительной оценкой $5(?) - 3$, а с $VEI = 4$ и $4+$ – 117. Извержения, имеющие сомнительные оценки $VEI 4(?)$, были исключены из анализа.

Временной сигнал в хронологиях по светлым кольцам в древесине

Светлые кольца в древесине лиственницы формируются достаточно редко. На разных точках частота их формирования изменяется от 0.11 до 0.48, составляя в среднем 0.3, т.е. треть лет от имеющейся длины древесно-кольцевой хронологии были со светлыми кольцами. В каждой точечной хронологии по светлым кольцам можно выделить год или два, когда формирование светлых колец было максимальным и составляло в среднем 79 % общего числа колец в этот год, за исключением т. 5, где количество светлых колец оказалось небольшим. Анализ точечных хронологий показал, что годы с массовым формированием светлых колец выявляются на больших территориях. Например, 1958 г. широко отмечен по Западной Сибири, 1783 г. – типичен для Средней Сибири, 1816 и 1886 годы выявлены в хронологиях Северо-Востока Сибири (табл. 2).

В обобщенной хронологии для всей Сибирской Субарктики хорошо видно, что светлые кольца отмечены почти каждый год, однако существуют годы, когда формируется

Таблица 2. Характеристики хронологий светлых колец в древесине лиственницы

№ точки	Число кернов	Начальный год	Длина хронологии, лет	Частота встречаемости СК	Среднее количество* СК, %	Максимум* СК, %	Год с максимумом СК
1	45	1940	69	0.35	43.6	53	1958
2	23	1561	430	0.36	25.5	83	1862
3	18	1562	429	0.32	22.2	82	1958
4	23	1553	438	0.29	31.4	82	1912
5	21	1925	85	0.25	16.4	29	1958
6	17	1615	376	0.30	30.6	89	1783
7	24	1540	451	0.30	25.2	81	1783
8	15	1644	347	0.20	37.6	100	1783
9	25	1600	391	0.23	30.6	75	1886
10	10	1425	567	0.28	24.9	80	1886
11	21	1518	474	0.30	31.6	94	1886
12	22	1301	691	0.11	23.6	91	1886
13	39	1425	670	0.34	23.5	84	1816
14	29	1414	581	0.48	24.4	88	1816
15	22	1412	580	0.36	19.2	71	1816
16	29	1468	524	0.58	19.1	79	1795
17	14	1568	424	0.21	22.0	80	1721
18	23	1420	572	0.29	22.8	86	1751

Примечания. Положение точек см. на рис. 1; СК – светлые кольца; * – значения для периода, обеспеченного 10 и более кернами.

небольшое (10 %) количество светлых колец и, наоборот, годы с количеством светлых колец больше среднего значения на одно стандартное отклонение и более. За период 1550–1992 гг. выделено 59 лет (около 13 %), когда количество светлых колец превышает среднее значение на одно среднеквадратичное значение. Таким образом, лет с массовым образованием светлых колец отмечено больше, чем лет с извержениями вулканов с $VEI \geq 5$ (34), но меньше, чем всех лет с $VEI \geq 4$. В обобщенную хронологию массового формирования светлых колец вошли практически все годы, следующие после извержений с $VEI = 6$, кроме 1646 и 1902 годов.

Сравнение групп по доле светлых колец, объединенных по VEI , показало, что максимальные значения количества светлых колец в обобщенной хронологии закономерно уменьшаются с уменьшением индекса, но никаких достоверных различий не было выявлено ни по медианам, ни при сравнении размаха варьирования количества светлых колец и VEI . Минимальные значения больше у группы лет с $VEI = 6$ (более 45 %), а у остальных групп, скорее всего, они лимитированы использованным в работе подходом – исключением из выборки тех лет, когда количество светлых колец меньше, чем среднее значение плюс одно стандартное отклонение. Более того, медианы количества светлых колец в годы с $VEI = 4$ или в годы без предшествующих извержений характеризуются такой же медианой, как и с $VEI = 5$, а в группах с $VEI = 4$ и без предшествующих 5-летних извержений вулканов отмечены годы с массовым формированием светлых колец, сопоставимые по количеству с формируемыми в группе с $VEI = 6$ (более 55 % светлых колец от общего числа) (рис. 5).

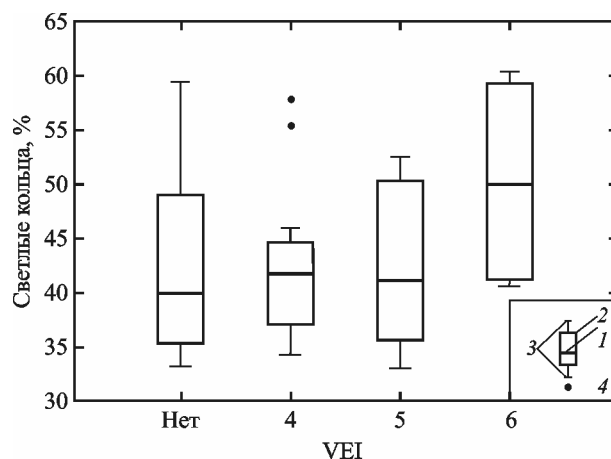


Рис. 5. Массовое формирование светлых колец в древесине лиственницы в зависимости от VEI

Здесь и на рис. 6: 1 – медиана; 2 – отклонение 25–75 %; 3 – минимум–максимум без учета выбросов; 4 – выбросы более чем на одно стандартное отклонение. «Нет» – отсутствие данных о крупных извержениях в предшествующие 5 лет

На рис. 5 хорошо выделяются два года, которые, несмотря на VEI = 4, отличались массовым формированием светлых колец, а значит, характеризовались сильным понижением температуры в течение вегетации и/или сокращением вегетационного сезона. Это 1570 г. – извержение вулкана Каямбе и 1751 г. – извержение вулкана Ксудач. Если исключить эти два года из анализа, то результаты *U*-теста и *H*-критерия показывают существенные статистические различия групп лет с VEI = 6 и VEI = 4. Между другими группами различия при условии исключения этих двух лет по количеству светлых колец в древесине лиственницы не выявлены.

Пространственный сигнал в хронологиях по светлым кольцам в древесине

Количество лет, когда светлые кольца формировались в один и тот же год более чем на 50 % точек, составило 82, что в целом составляет 18 % от общей длины древесно-кольцевой хронологии. В пространственной хронологии по светлым кольцам найдены годы, в которые светлые кольца проявились на всех точках: 1572, 1579, 1589, 1601, 1607, 1614, 1721, 1783, 1885 и 1992. Из них четыре года – следствие формирования светлых колец после извержений с VEI = 6, один год – после извержения с VEI = 5 и четыре года – после извержения с VEI = 4 или 4+. Самое крупное извержение – извержение вулкана Тамбора (VEI = 7) – проявилось на относительно небольшом количестве точек (62 % общего числа). Единственный год с массовым формированием светлых колец на всех точках, 1589 г., не подтвержден никаким извержением в предыдущие три года. Все эти годы характеризуются массовым формированием светлых колец в древесине лиственницы на изученных точках (более 40 % годовичных колец со светлыми кольцами от общего числа колец).

Массовое формирование светлых колец как на отдельно взятых точках, так и по всей территории сибирской лесотундры происходило в одни и те же годы (выявлено 40 общих лет). Коэффициент корреляции (r^2) между рядами по календарным годам на основе двух использованных хронологий (хронология на основе массового формирования светлых колец и пространственная хронология светлых колец) составил 0.98. Годы с максимальным количеством светлых колец на отдельно взятых точках часто совпадали с годами, когда светлые кольца в древесине лиственницы формировались в сибирской лесотундре наиболее широко (см. табл. 2).

По результатам попарного сравнения независимых групп U -тестом Манна–Уитни получены различия по распространенности светлых колец в древесине лиственницы и VEI. В случае VEI = 6 и выше светлые кольца выявлены на большой территории (от 40 до 100 % местообитаний «зарегистрировали» извержение), что существенно больше, чем в годы с VEI < 6 и в годы без предшествующих крупных извержений. Различий в распространении светлых колец у групп, сформированных на основе VEI = 4 и VEI = 5, не выявлено. Использование H -критерия Крускала–Уоллиса также показало, что после извержений с VEI = 6 количество местообитаний в сибирской лесотундре, на которых наблюдались условия, ведущие к формированию светлых колец в древесине лиственницы, существенно больше, чем в годы с менее сильными извержениями (рис. 6).

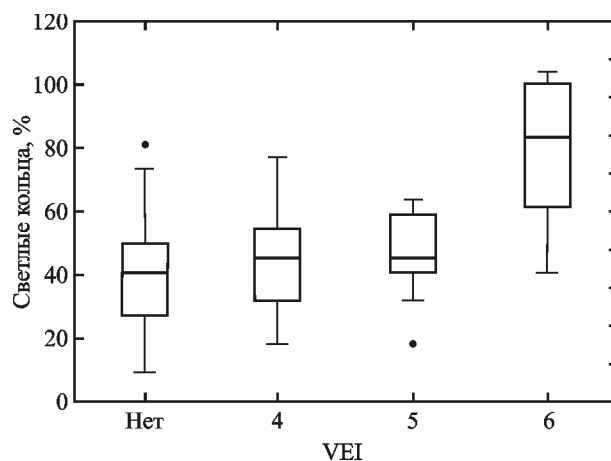


Рис. 6. Пространственное распределение светлых колец по сибирской лесотундре в зависимости от VEI
Усл. обозн. те же, что на рис. 5

Пространственно-временной сигнал в хронологиях светлых колец в древесине

Исходя из полученных хронологий, проанализирована длительность эффекта эксплозивных извержений, а именно, проведено сравнение количества лет, которые следуют непосредственно за извержением и в которые образуются светлые кольца годичных колец лиственницы. После извержения вулкана Тамбора (VEI = 7) светлые кольца массово формировались в течение четырех последующих лет (1816–1818 гг.). Возможно, такой долговременный эффект может быть обусловлен и дополнительным охлаждающим эффектом извержения вулкана Колима в 1818 г. После извержений с VEI = 6 светлые кольца формировались в период от одного до трех лет, а одно высокоэксплозивное извержение (вулкан Лонг-Айленд), датированное приблизительно 1646 г., не оказало никакого влияния на формирование годичных колец древесины лиственницы, произрастающей в сибирской лесотундре. Извержения с VEI = 5 также имеют последствия в виде формирования светлых колец от одного до трех лет и также отмечены годы, когда никакого влияния не было выявлено. Извержения с VEI = 4 оказались очень частыми и обладают неоднозначным влиянием на формирование годичных слоев древесины лиственницы, поэтому для выявления пространственно-временного сигнала были выбраны годы только с двойными извержениями с VEI = 4. Этот выбор был обусловлен предположением, что во время двойных извержений выбрасывается большее количество тефры и пепла в атмосферу по сравнению с одинарными. В этом случае также было получено, что эффекты двойных извержений длятся около одного года (рис. 7). Сравнение этих групп U -тестом показало, что достоверных статистических различий между группами нет, последствия сильных извержений проявляются одинаково и не зависят от VEI.

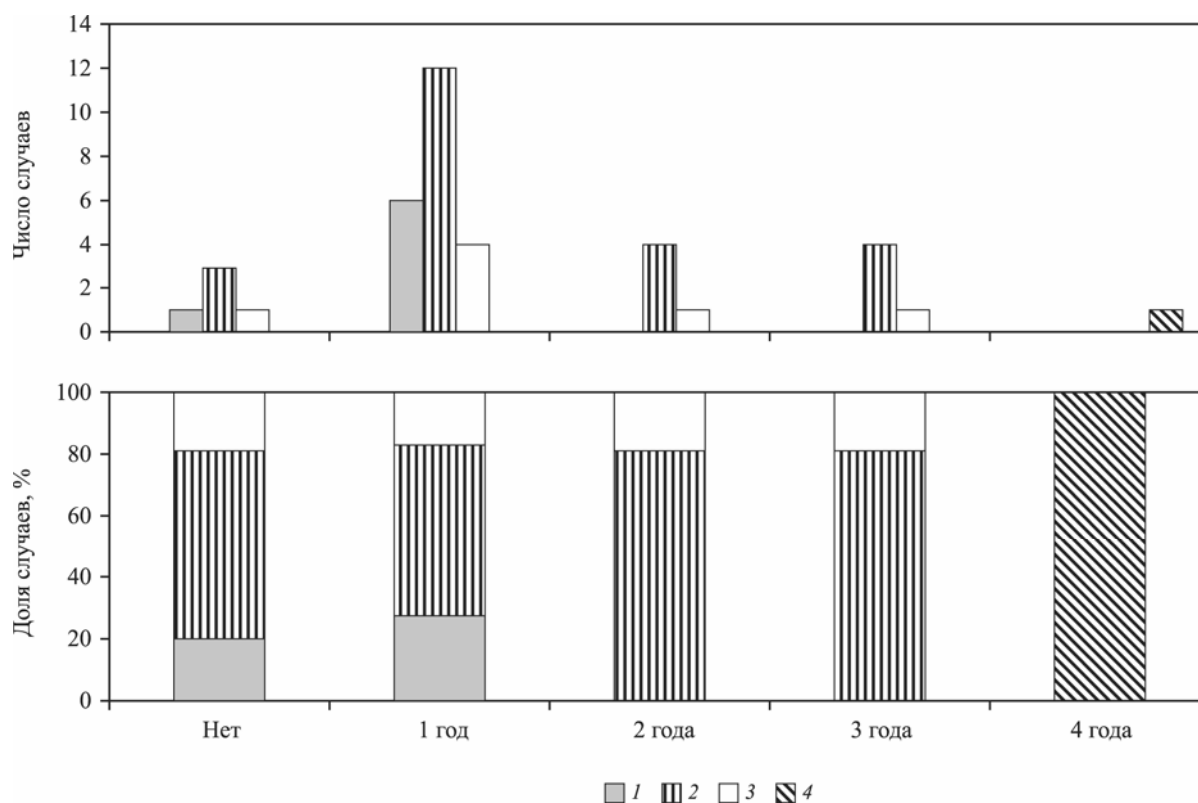


Рис. 7. Количество лет, следующих после сильных извержений вулканов, когда происходит формирование светлых колец в древесине лиственницы

«Нет» – отсутствие светлых колец в последующие 2 года после извержения. 1 – VEI = 4 – случаи, когда происходит не менее двух извержений в год; 2–4 – VEI соответственно равно 5, 6 и 7 – случаи, когда хотя бы одно извержение года имело этот индекс вулканической активности

Обсуждение результатов

Крупные извержения вулканов с выбросом более 10 км^3 пепла и пыли ведут к уменьшению приходящей солнечной радиации и глобальному понижению температуры воздуха, а следовательно, к уменьшению годичного прироста деревьев, произрастающих в пределах распространения воздействия извержений [Briffa et al., 1998]. Для установления календарных дат извержений вулканов в прошлом успешно применяются дендрохронологические методы датирования. Например, извержения вулкана Св. Елены в 1480, 1482 и 1800 годах датированы Д.К. Ямагучи [Yamaguchi, 1983, 1985] на основе использования ширины годичных колец пихты Дугласа (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb). Franko).

Анатомическая структура годичных колец деревьев также очень чувствительна к изменениям термического режима вегетационного сезона. Длительное понижение температуры во второй половине вегетации ведет к нарушению формирования зоны поздней древесины, что выражается в формировании светлых колец. Например, для высоких широт Западной Сибири отмечено, что в годы формирования светлых колец вегетационный период начинается на 1–2 недели позже. Кроме позднего начала вегетационного сезона, средняя температура мая и июня в годы, когда в древесине лиственницы формировались светлые кольца, была ниже среднемноголетней на $1\text{--}2^\circ$, а август – холоднее на 5° , в то время как в июле, наоборот, температура была выше средних многолетних значений [Гурская, Агафонов, 2013]. Существуют многочисленные свидетель-

ства того, что в основном температуры ниже средних многолетних значений в конце вегетационного сезона (августа) влияют на формирование светлых колец [Filion et al., 1986; Yamaguchi et al., 1993; Girardin et al., 2009].

К. Бриффа с соавт. в цикле работ показали, что после сильных вулканических извержений в Северном полушарии существенно уменьшалась ширина годовых колец и максимальная плотность древесины в 1587, 1601, 1641–1643, 1666, 1675, 1695, 1698–1699, 1740, 1783, 1816–1818, 1884 и 1912 годы. Авторы связывают уменьшение этих биофизических характеристик колец с временным похолоданием в течение вегетации, вызванным вулканической активностью. Но VEI извержений этих лет варьирует от 4 до 6, а для 1675 г. и 1698–1699 гг. никаких предшествующих вулканических извержений не указано [Briffa et al., 1998, 2002]. Эти же годы, за исключением 1666 г., также отмечены в указанных работах как годы с массовым и повсеместным изменением анатомической структуры годовых колец лиственницы. У лиственниц, произрастающих в высоких широтах Сибири, светлые кольца формируются часто, и среди перечисленных выше лет можно выделить годы с массовым формированием светлых колец, связанным с высокоэксплозивными извержениями вулканов, которые оцениваются $VEI > 6$. Согласно полученным нами результатам, формирование светлых колец более чем 50 % от общего количества колец в конкретный год может быть маркером сильных вулканических извержений. Основной причиной массового формирования светлых колец можно считать наступающее понижение температуры в течение вегетационного сезона, которое, возможно, связано с выбросами пепла, пыли и газов.

Анализ пространственного распределения светлых колец выявил также определенный пороговый уровень: катастрофические извержения с $VEI = 6$, оказывающие глобальные эффекты на атмосферные процессы и перераспределение тепла, могут быть «зарегистрированы» в древесине лиственницы, произрастающей по всей сибирской лесотундре на очень больших расстояниях. Более слабые извержения чаще выявляются на существенно меньшем расстоянии (на меньшем количестве изученных точек).

На основе имеющихся в нашем распоряжении данных сложно оценить долговременные эффекты извержений с разным VEI в целом на экосистемы севера Сибири. Иногда наблюдаются долгосрочные эффекты, которые могут быть следствием отклика как на катастрофические извержения, так и на серию сильных извержений с $VEI > 4$. Примером такого продолженного отклика являются последствия извержения вулканов Тамбора и Кракатау, «поддержанные» спустя 3–4 года извержениями вулканов Колима и Окатаина, когда формирование светлых колец в древесине лиственницы оставалось на высоком уровне. В то же время есть извержения с $VEI = 6$, после которых эффекты в виде формирования светлых колец длились 1–2 года или не были зафиксированы совсем.

Отдельного анализа требует такой феномен, как годы с большим количеством светлых колец в древесине лиственницы без предшествующих извержений. В данной работе указаны годы, когда светлые кольца формировались массово и на большой площади, что характерно для отклика на какие-то глобальные биосферные климатические явления. Наибольшее количество таких лет отмечено в период 1550–1850 гг., когда данные об извержениях вулканов (например, в горах Южной Америки или в Антарктиде) могли быть неполными. На этот же период приходится основное количество лет с сомнительной датировкой извержений и сомнительными оценками VEI. Поэтому одной из наиболее простых и очевидных гипотез, объясняющих формирование большого количества светлых колец в древесине лиственницы в высоких широтах Сибири в это время, является уточнение оценок VEI. Как известно, VEI является комплексным показателем, включающим не только объем эксплозивного материала, но и высоту столба пепла, пы-

ли и газов. Поэтому несовпадение значений VEI и количества светлых колец в древесине (а также уменьшение ширины годичного кольца и максимальной плотности древесины) могут быть следствием очень высокого, достигающего уровня стратосферы (а не только высоких слоев тропосферы), выброса обломочного материала. Относительно небольшое количество пепла и пыли, достигшее стратосферы, оказывает более сильный охлаждающий эффект за счет отражения приходящей солнечной радиации, чем большое количество вулканического выброса, сосредоточенное в нижних слоях тропосферы.

Полученные данные предполагают также уточнение датировок крупных извержений вулканов, которые могли способствовать сильному понижению температуры в течение вегетационного сезона в последующие годы на биосферном уровне.

Еще одна гипотеза, которая могла бы как-то объяснить полученные результаты, – биогенное формирование светлых колец, а именно, дефолиация насекомыми, – в нашем случае не может быть применена, так как в районе исследования отсутствуют вспышки численности насекомых из-за суровых климатических условий [Baranchikov, 1997].

Кроме вышеизложенных гипотез, связывающих массовое формирование светлых колец в древесине хвойных деревьев на больших территориях и катастрофические извержения вулканов, нельзя сбрасывать со счетов и влияние особенностей естественной атмосферной циркуляции, обусловленной разными причинами: влияние солнечной активности, северо-атлантическая атмосферная циркуляция, тихоокеанская осцилляция атмосферного давления, эффекты Эль-Ниньо. Однако все эти природные колебания отличаются волнообразной динамикой, а не резкими точечными проявлениями. Возможно, данные по количеству светлых колец, которые были исключены нами из рассмотрения (см. рис. 3), как раз отражают периодичность естественной атмосферной циркуляции и требуют дальнейшего детального анализа.

Оценка некоторых извержений вулканов по светлым кольцам в древесине лиственницы

Рассмотрим некоторые извержения, существующие оценки которых не совпадают с данными, полученными по светлым кольцам. Нами предполагаются другие возможные даты извержений или другие индексы вулканической активности. Эти данные могут быть темой дальнейшего обсуждения с целью уточнения датировки вулканов или других глобальных экстремальных явлений.

Случаи массового формирования светлых колец и известные извержения вулканов

1570 г. Извержение вулкана Каямбе имеет VEI = 4, но, судя по количеству светлых колец, сформировавшихся в древесине лиственницы в этот и в последующий годы, можно предположить, что выбросы пепла и пыли в период извержения были более мощными (более высокими или большого объема), что привело к довольно длительному похолоданию и массовому формированию светлых колец.

1597 г. Извержение вулкана Гекла (VEI = 5) не оказало какого-либо эффекта на окружающую среду. Возможно, имеющийся индекс эксплозивной активности этого извержения несколько завышен. Влияние извержения на лесотундровые экосистемы Сибири оказалось не столь катастрофическим, согласно количеству и ширине светлых колец в древесине лиственницы, произрастающей в высоких широтах Сибири.

1580 г. Извержение вулкана Билли Митчелл в настоящее время не имеет четкой датировки. Согласно нашим данным, в годы после 1578 г. было некое сильное влияние на

климатическую составляющую экосистем севера Сибири, приведшее к глобальному похолоданию и укорочению вегетационного периода. В пределах всего Северного полушария наблюдается серия лет (с 1578 по 1580 г.) с очень большим количеством светлых колец в древесине деревьев [Briffa et al., 1998, 2002]. Возможно, что извержение вулкана Билли Митчелл было раньше, в 1577–1578 гг.

1612 г. Интересно, что возможные экологические последствия извержения вулкана Катла проявились через два года после извержения. Такая отложенная по времени реакция является, вероятно, типичной для этого вулкана. Так, после извержений вулкана Катла в 1625, 1755, 1860 годах массовое формирование светлых колец также отмечено через два года.

1630 г. Сильное извержение вулкана Фурнас в сентябре 1630 г. и последующее извержение вулкана на о. Раул не проявились в формировании светлых колец в этот же год. Однако формирование светлых колец в этот год в древесине лиственницы почти на половине всех исследованных нами точек указывает на влияние какого-то другого фактора, возможно, эксплозивного извержения в 1628–1629 гг.

1646 г. Дата извержения вулкана Лонг-Айленд окончательно не установлена. По данным К. Бриффы с соавт. [Briffa et al., 2002], сильного понижения температуры в 1646–1647 гг. не наблюдалось. В указанной работе также показано, что в этот период не было и массового формирования светлых колец (см. табл. 2). То есть этот год не является годом, характеризующимся изменением оптического состава атмосферы за счет увеличения концентрации пыли и газов, а следовательно, не является годом с извержением вулкана с $VEI = 6$. Можно предположить, что сильное извержение было в 1641–1642 гг. Возможно, что массовое формирование светлых колец в эти годы есть отклик на понижение температуры из-за извержения в 1640 г. вулкана Комага-Таке ($VEI = 5$). Также можно предположить, что извержение вулкана Лонг-Айленд было в 1650 или в 1657 г., когда происходило массовое формирование светлых колец, не подкрепленное ни одним извержением.

1707 г. Мощное извержение вулкана Фудзи в декабре 1707 г. не оказало никакого воздействия на прирост лиственницы на севере Сибири. Возможно, индекс активности этого извержения несколько завышен. Однако в 1711 г. наблюдается очень сильная реакция годовичных колец, связанная с существенным понижением температуры в течение периода вегетации. Возможно, именно светлые кольца 1711 г. являются существенно отложенным по времени откликом на извержение Фудзи или где-то было еще одно, не установленное, катастрофическое извержение в период 1710–1711 гг., оказавшее сильный эффект на экосистемы Северной Сибири, так как образование светлых колец происходило в течение нескольких последующих лет.

1783 г. Извержение вулкана Гримсвётн в 1783 г. оказало существенно более сильное влияние на климатическую обстановку в высоких широтах, чем это следует, исходя из полученных значений VEI . Катастрофические последствия этого извержения в течение одного года в виде светлых колец с тонкой зоной поздней древесины зарегистрированы по всей Сибирской Субарктике. Также светлые кольца отмечены исследователями и в высоких широтах на Аляске и в Канаде [D'Arrigo, Jacoby, 1999]. Возможно, это извержение было более эксплозивным, чем принято его оценивать сейчас.

1902 г. Извержение вулкана Санта-Мария (24.10.1902 г.) теоретически должно быть «зарегистрировано» в годовичных кольцах 1903 г. Длительное, но более слабое извержение вулкана Пеле в этот же год также могло способствовать формированию светлых колец в 1903–1904 гг. В 1903 г. формируются узкие кольца в древесине деревьев на Полярном Урале и п-ове Ямал [Hantemirov et al., 2004]. Также в пределах всего Северного

полушария отмечено понижение температуры воздуха [Briffa et al., 2002]. Но совершенно непонятно, как эти извержения могли оказать какое-то заметное влияние на повсеместное формирование в большом количестве светлых колец через три года, в 1905 г. Во всех других рассмотренных выше случаях извержения с VEI = 6 оказывали влияние на высокоширотные биомы Сибири в текущем или в следующем году. Вероятно, в данном случае последующие слабые (VEI = 4) извержения вулканов Гримсвётн и Лолобау соответственно в 1903 и 1904 гг. могли обусловить холодное или короткое лето в 1905 г. Также допустимо, что лихенометрически подтвержденное извержение вулкана на о. Пингвин [Angiel, Dąbski, 2012] могло быть в 1904 г. или в первой половине 1905 г. и повлияло на климатическую ситуацию в сибирской лесотундре, приведя к массовому формированию светлых колец в 1905 г.

*Случаи массового формирования светлых колец
без предшествующих извержений вулканов*

1557 г. Массовое формирование светлых колец в древесине лиственницы Сибирской Субарктики в этот год на 100 % изученных местообитаний и более чем у 50 % колец указывает на экстремальное климатическое явление, распространенное на большой территории. Это могло быть откликом на извержение вулкана в 1556 г. или в начале 1557 г.

1567 г. Ближайшее сильное извержение зарегистрировано в 1563 г., оно подтверждено большим количеством светлых колец в древесине. В 1564–1566 гг. светлые кольца в древесине лиственницы не формируются. Следовательно, формирование светлых колец в 1567 г. не является следствием извержения 1563 г., а представляет собой отклик на какое-то другое глобальное экстремальное явление.

1579 г. В этот год отмечено массовое формирование светлых колец, которое могло быть следствием извержения вулкана Билли Митчелл или другого, не менее сильного вулкана с высоким значением VEI.

1589 г. Последствия извержения вулкана Келют отмечены узкими годичными кольцами в 1587 г. [Briffa et al., 1998] и массовым формированием светлых колец; в 1588 г. количество светлых колец существенно уменьшается. Массовое образование светлых колец в 1589 г., скорее всего, является реакцией на другое экстремальное явление, приведшее к глобальному понижению температуры в этот год. Узкие годичные кольца с низкой плотностью отмечены в древесине деревьев по всему Северному полушарию [Briffa et al., 1998].

1621 г. Извержение вулкана Колима в 1622 г. в настоящее время хорошо датировано, но его последствия, хотя и «зарегистрированы» в годичных кольцах, не настолько выражены по сравнению с реакцией годичных колец лиственницы в 1621 г. В 1621 г. массовое формирование светлых колец может быть следствием какого-то неустановленного извержения в 1620–1621 гг.

1634 г. Глобальное понижение температуры в течение вегетационного периода повлекло образование светлых колец в древесине деревьев сибирской лесотундры и лесотундры США [D'Arrigo, Jakobi, 1999; D'Arrigo et al., 2013]. Возможно, было катастрофическое извержение вулкана в 1633 г. или в первой половине 1634 г.

1642 г. Влияние извержения вулкана Комага-Таке, произошедшего в 1640 г., выглядит сомнительным, так как последствия этого извержения в структуре годичных колец деревьев проявились незначительно на следующий, 1641 г. Массовое же формирование светлых колец в древесине лиственницы на всей территории Сибири наблюдается год

спустя и продолжается в течение двух лет. Низкая плотность поздней древесины в кольцах 1643 г. выявлена у произрастающих в США деревьев [D'Arrigo, Jakobi, 1999].

1657 г. Является ли массовое формирование светлых колец в этом году следствием извержения вулкана Таранаки в 1655 г., неизвестно. Возможно, что было еще какое-то извержение в 1656–1657 гг., которое привело к ухудшению климатических условий вегетационного периода.

1674–1676 гг. Формирование светлых колец выражено в течение трех лет с максимумом в 1675 г. Светлые кольца этих лет отмечены в древесине деревьев, произрастающих на территории США [Delwaide et al., 1991], а общее уменьшение ширины годовичных колец отмечено по всему Северному полушарию [Briffa et al., 1998]. Возможно, в 1673–1674 гг. было сильное извержение какого-то вулкана.

1679–1680 гг. Экстремальное понижение температуры в течение вегетации в эти годы отмечено по всему Северному полушарию. В США это явление в древесине деревьев «зарегистрировано» морозобойными и светлыми кольцами [Delwaide et al., 1991], в Сибирской Субарктике – формированием светлых колец в течение двух лет [Hantemirov et al., 2004].

1698 г. Низкая в течение двух лет максимальная плотность годовичных колец деревьев по всему Северному полушарию указывает на возможное сильное извержение в 1696–1698 гг. [Briffa et al., 1998].

1711 г. Особенности формирования светлых колец в древесине описаны в предыдущем разделе данной работы при анализе извержения вулкана Фудзи в 1707 г.

1730–1732 гг. Массовое формирование светлых колец в древесине деревьев на всей территории Сибири в 1730–1732 гг., возможно, является следствием нескольких извержений в предшествующие год–два, но количество описанных и подтвержденных на сегодня извержений в период 1728–1729 гг. (11 извержений за два предшествующих года) не является большим по сравнению с другими периодами. Однако наличие более 60 % местообитаний, имеющих светлые кольца в древесине лиственницы, указывает на действие сильного фактора, приведшего к короткому или холодному вегетационному периоду на большой территории.

1735 г. Массовое формирование светлых колец в этот год на большой территории указывает на действие сильного фактора, повлиявшего на циркуляцию воздушных масс в Сибирской Субарктике и вызвавшего похолодание в летний период 1735 г.

1772 г. Период 1772–1773 гг. характеризуется формированием светлых колец в древесине лиственницы на более чем 60 % местообитаний и также не подтверждается сильными извержениями вулканов. Можно предположить, что формирование светлых колец в эти годы является отложенным по времени откликом экосистем на извержение вулкана Котопакси в 1768 г. (как было предположено и для 1538 г.) или реакцией на извержение с $VEI \geq 4$ в 1770–1771 гг.

1797 г. Возможно, некоторые из наблюдаемых извержений в эти годы характеризовались более высоким, чем предполагается в настоящее время, $VEI (\geq 4)$, на что указывает массовое формирование светлых колец в древесине деревьев на более чем 70 % местообитаний.

1809 г. О сильном извержении 1808–1809 гг., согласно результатам исследования ледовых кернов, упоминается в исследованиях Дж. Дэй [Dai et al., 1991]. Массовое формирование светлых колец также подтверждает сильное действие какого-то фактора в 1808–1809 гг., приведшее к глобальному похолоданию в течение вегетационного сезона 1809 г.

1837 г. В этот год низкая плотность поздней древесины была отмечена в деревьях всего Северного полушария [Briffa et al., 1998]. Массовое формирование морозобойных колец в поздней древесине хвойных наблюдалось в высоких широтах Северной Америки [Brunstein, 1996], что указывает на краткосрочное экстремальное явление, а именно, на очень короткий вегетационный сезон. Извержение вулкана Косигуина в 1835 г. могло стать фактором, влияющим на формирование светлых колец. После этого извержения происходило ухудшение условий роста деревьев, достигшее максимума в период 1836–1837 гг. Возможно, извержение вулкана Косингуина характеризовалось более высоким (> 4), чем принято сейчас, VEI или были незарегистрированные извержения других вулканов.

1847–1949 гг. Ближайшее к этим годам извержение вулкана Гекла в 1845 г. проявилось в виде небольшого количества светлых колец в 1846 и 1847 годах. А массовое формирование светлых колец в древесине лиственницы в Сибирской Субарктике и морозобойных повреждений в поздней древесине хвойных в Квебеке [Brunstein, 1996] в 1847–1849 гг. могло происходить под влиянием еще каких-то, более сильных извержений или других экстремальных явлений, оказавших заметное влияние на циркуляцию атмосферы.

1862–1863 гг. В этот период в древесине сибирской лиственницы формируется большое количество светлых колец. Особенно массово их формирование происходит в 1863 г. (половина исследованных точек). Возможно, это является отложенным во времени эффектом извержения вулкана Катла или еще какого-либо вулкана в 1861–1862 гг.

1866–1867 гг. Формирование светлых колец в древесине лиственницы, произрастающей в сибирской лесотундре, и морозобойных колец в хвойных, произрастающих в Квебеке, [Brunstein, 1996] в период 1866–1867 гг. может быть обусловлено каким-то сильным извержением вулкана в предшествующие год–два.

1905 г. Формирование светлых колец в древесине сибирской лиственницы в этот год описано выше при характеристике извержения вулкана Санта-Мария в 1902 г.

Заключение

На основании проведенных нами исследований можно сказать, что светлые кольца, формирующиеся в древесине лиственницы, произрастающей в лесотундровой зоне Сибири, могут быть использованы для выявления исторических сильных извержений. Высокоексплозивные извержения вулканов прошлого не только «зарегистрированы» в светлых кольцах, но и дифференцированы по VEI.

Следует, однако, заметить, что светлые кольца в древесине деревьев не являются единственным маркером, показывающим силу извержений вулканов. Для окончательного заключения и датировки извержений следует использовать комплексные данные, а именно, не только наличие светлых колец, но и ширину годичных колец, и максимальную плотность древесины. Для окончательных выводов необходимо объединение усилий вулканологов, дендрохронологов и специалистов по другим методам датирования (ледовым кернам, коралловым рифам и т.д.).

Более глубокое и детальное изучение на разных (биосферном, региональном и локальном) уровнях природных закономерностей и механизмов и следующих за катастрофическими извержениями вулканов процессов даст возможность лучше понять механизм их влияния на биосферу и оценить ущерб от будущих извержений.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 14-04-91356 и № 15-04-04933), а также Программы УрО РАН № 15-2-4-22. Особая благодарность членам международной экспедиции 1992 г. Ф. Швайнгруберу, К. Бриффе, С.Г. Шиятову, В.С. Мазепе, Е.А. Ваганову. В данной работе использованы образцы древесины, собранные в ходе этой экспедиции С.Г. Шиятовым и В.С. Мазепой.

Литература

- Абаимов А.П.* Лиственничные леса и редколесья севера Сибири (разнообразие, особенности экологии и лесообразовательного процесса): Автореф. дис. ... д-ра биол. наук. Новосибирск, 1997. 48 с.
- Ваганов Е.А., Шиятов С.Г., Мазепа В.С.* Дендроклиматические исследования в Урало-Сибирской Субарктике. Новосибирск: Изд. фирма СО РАН, 1996. 246 с.
- Гурская М.А., Агафонов Л.И.* Реконструкция коротких вегетационных сезонов на севере Западной Сибири по хронологиям светлых годичных колец деревьев // Изв. РАН. Сер. геогр. 2013. № 1. С. 42–53.
- Гурская М.А., Бенькова В.Е.* Типы светлых колец у *Larix sibirica* Ledeb. и *L. Gmelinii* (Rupr.) Rupr. на верхней границе леса в Урало-Сибирской Субарктике // Ботан. журн. 2013. Т. 98, № 8. С. 103–120.
- Западная Сибирь: Природные условия и естественные ресурсы СССР. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 488 с.
- Сайт в Интернете: <http://www.bgs.ac.uk/vogripa>
- Сайт в Интернете: <http://www.volcano.si.edu>
- Средняя Сибирь: Природные условия и естественные ресурсы СССР. М.: Наука, 1965. 480 с.
- Якутия: Природные условия и естественные ресурсы СССР. М.: Наука, 1965. 468 с.
- Angiel P.J., Dąbski M.* Lichenometric ages of the little ice age moraines on King George Island and of the last volcanic activity on Penguin Island (West Antarctica) // Geogr. Ann. Ser. A. Phys. Geogr. 2012. V. 94, N 3. P. 395–412.
- Baranchikov Yu.N.* Siberian forest insects: ready for export // Proc. exotic pests of eastern forests conference. Nashville: USDA Forest Service, 1997. P. 64–70. URL: <http://www.invasive.org/symposium/baranchi.html>
- Briffa K., Jones P., Schweingruber F., Osborn T.* Influence of volcanic eruptions on Northern Hemisphere summer temperature over the last 600 years // Nature. 1998. N 393. P. 450–455.
- Briffa K.R., Osborn T.J., Schweingruber F.H., Jones Ph.D., Shiyatov S.G., Vaganov E.A.* Tree-ring width and density data around the Northern Hemisphere. Pt. 2. Spatio-temporal variability and associated climate patterns // The Holocene. 2002. V. 12, N 6. P. 759–789.
- Brunstein F.G.* Climatic significance of the bristlecone pine latewood frost ring record at Almagre mountain, Colorado, USA // Arct. Alp. Res. 1996. V. 28, N 1. P. 65–76.
- Crowley T., Quinn T., Taylor F., Henin C., Joannot P.* Evidence for a volcanic cooling signal in a 335-year coral record from New Caledonia // Geophys. Res. Lett. 1997. N 12. P. 633–639.
- D'Arrigo R., Jacoby G.* Northern North American tree-ring evidence for regional temperature changes after major volcanic events // Climat. Change. 1999. N 41. P. 1–15.
- D'Arrigo R., Wilson R., Tudhope A.* The impact of volcanic forcing on tropical temperatures during the past four centuries // Nature Geosci. 2009. N 2. P. 51–56.

- D'Arrigo R., Wilson R., Anchukaitis K.J.* Volcanic cooling signal in tree ring temperature records for the past millennium // *J. Geophys. Res.* 2013. N 118. P. 9000–9010.
- Dai J., Mosley-Thompson E., Thompson L.* Ice core evidence for an explosive tropical eruption six years preceding Tambora // *J. Geophys. Res.* 1991. V. 96, N D9. P. 17361–17366.
- Delwaide A., Fillion L., Payette S.* Spatiotemporal distribution of light rings in subarctic black spruce, Quebec // *Canad. J. For. Res.* 1991. V. 21, N 12. P. 1828–1832.
- Esper J., Buentgen U., Luterbacher J., Krusic P.J.* Testing the hypothesis of postvolcanic missing rings in temperature sensitive dendrochronological data // *Dendrochronologia.* 2013. V. 31. P. 216–222.
- Fillion L., Payette S., Gauthier L., Boutin Y.* Light rings in sub-arctic conifers as a dendrochronological tool // *Quarter. Res.* 1986. N 26. P. 272–279.
- Fritts H.C.* Tree rings and climate. London; N.Y.; San-Francisco: Acad. Press, 1976.
- Gao C.C., Robock A., Ammann C.* Volcanic forcing of climate over the past 1500 years: an improved ice core-based index for climate models // *J. Geophys. Res.* 2008. N 113. URL: <http://dx.doi.org/10.1029/2008JD010239>
- Girardin M.P., Tardif J.C., Epp B., Conciatori F.* Frequency of cool summers in interior North America over the past three centuries // *Geophys. Res. Lett.* 2009. V. 36, N 5.
- Gurskaya M.A., Hallinger M., Eckstein D., Wilmking M.* Extreme cold summers in Western Siberia derived from light rings of conifers // *Phyton.* 2012. V. 52, N 1. P. 101–119.
- Hantemirov R.M., Gorlanova L.A., Shiyatov S.G.* Extreme temperature events in summer in Northwest Siberia since AD 742 inferred from tree rings // *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology.* 2004. V. 209. P. 155–164.
- Holmes R.L.* Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement // *Tree-Ring Bull.* 1983. V. 43. P. 69–78.
- Jacoby G.C., Workman K.W., D'Arrigo R.D.* Laki eruption of 1783, tree rings, and disaster for North-West Alaska Inuit // *Quarter. Sci. Rev.* 1999. V. 18. P. 1365–1371.
- Jones P.D., Briffa K.R., Schweingruber F.N.* Tree ring evidence of the widespread effects of explosive volcanic eruptions // *Geoph. Res. Lett.* 1995. V. 22, N 11. P. 1333–1336.
- Kaennel M., Schweingruber F.H.* Multilingual glossary of dendrochronology. Bern: Paul Haupt Publ., 1996. 467 p.
- Körner C., Krusic P.J., Luckman B., Melvin T.M., Salzer M.W., Shashkin A.V., Timmreck C., Kurbatov A.V., Zielinski G.A., Dunbar N.W., Mayewski P.A., Meyerson E.A., Sneed S.B., Taylor K.C.* A 12,000 year record of explosive volcanism in the Siple Dome Ice Core, West Antarctica // *J. Geoph. Res.: Atmospheres.* 2006. V. 111, N D12. P. 27.
- Kurbatov A.V., Zielinsky G.A., Dunbar N.V., Mayewski P.A., Meyerson E.A., Sneed S.B., Taylo K.C.* A 12,000 year record of explosive volcanism in the Siple Dom Ice Core, West Antarctica // *J. Geoph. Res.: Atmospheres.* 2006. V. 111, N D12.
- LaMarch V.C., Hirschboeck K.K.* Frost rings in trees as records of major volcanic eruptions // *Nature.* 1984. V. 307. P. 121–126.
- Newhall C.A., Self S.* The volcanic explosivity index (VEI): an estimate of the explosive magnitude for historical volcanism // *J. Geophys. Res.* 1982. V. 87. P. 1231–1238.
- Rinn F.* TSAP time series analysis and presentation. Version 3.0. Reference manual. Heidelberg, Germany: Frank Rinn Co., 1996. 262 p.
- Robock A.* Volcanic eruptions and climate // *Rev. Geophys.* 2000. V. 38. P. 191–219.
- Salzer M., Hughes M.* Bristlecone pine tree rings and volcanic eruptions over the last 5000 yr. // *Quat. Res.* 2007. V. 67. P. 57–68.
- 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. Geophys. Res.* 2009. V. 114. P. D15101.

- Schweingruber F.H.* Wood structure and environment. Berlin, Heidelberg: Springer, 2007. 279 p.
- Siebert L., Simkin T., Kimberly P.* Volcanoes of the world. Berkeley: Univ. of California Press, 2010. 568 p.
- Sigl M., Winstrup M., McConnell J.R., Welten K.C., Plunkett G., Ludlow F., Buettgen U., Caffee M., Chellman N., Dahl-Jensen D., Fischer H., Kipfstuhl S., Kostick C., Maselli O.J., Mekhaldi F., Mulvaney R., Muscheler R., Pasteris D.R., Pilcher J.R., Salzer M., Schuepbach S., Steffensen J.P., Vinther B.M., Woodruff T.E.* Timing and climate forcing of volcanic eruptions for the past 2,500 years // *Nature*. 2015. V. 523. P. 543–548.
- Sigl M., McConnell J.R., Layman L., Maselli O., McGwire K., Pasteris D., Dahl-Jensen D., Steffensen J.P., Vinther B., Edwards R., Mulvaney R., Kipfstuhl S.* A new bipolar ice core record of volcanism from WAIS Divide and NEEM and implications for climate forcing of the last 2000 years // *J. Geophys. Res.* 2013. V. 118. P. 1151–1169.
- Stothers R.B.* Volcanic dry fogs, climate cooling, and plague pandemics in Europe and the Middle East // *Clim. Change*. 1999. V. 42. P. 713–723.
- Vaganov E.A., Wilson R.J.S.* Tree rings and volcanic cooling // *Nature Geosci.* 2012. V. 5. P. 836–837.
- Yamaguchi D.K.* New tree-ring dates for recent eruptions of Mount St. Helens // *Quater. Res.* 1983. V. 20, N 2. P. 246–250.
- Yamaguchi D.K.* Tree-ring evidence for a two-year interval between recent prehistoric explosive eruptions of Mount St. Helens // *Geology*. 1985. V. 13, N 8. P. 554–557.
- Yamaguchi D.K., Fillion L., Savage M.* Relationship of temperature and light ring formation at subarctic treeline and implications for climate reconstruction // *Quaternary Res.* 1993. V. 3. P. 256–262.

Сведения об авторе

ГУРСКАЯ Марина Анатольевна – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Институт экологии растений и животных УрО РАН. 620144, г. Екатеринбург, ул. 8 Марта, д. 202. Тел.: +7 (963) 036-88-65. E-mail: mgurskaya@yandex.ru

USE OF LARCH LIGHT RINGS FOR EVALUATION OF VOLCANIC EXPLOSIVITY INDEX

M.A. Gurskaya

Institute of Plant and Animal Ecology, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
Ekaterinburg, Russia

Abstract. Volcanic eruptions lead to a global short-term drop in air temperature, including a shortening of the growing season. A reaction to these short-term climatic changes is the formation of light rings in the Siberian larches growing in the Siberian Subarctic area. Based on the analysis of larch cores collected at 18 points in the northern forest–tundra from 67°32' to 167°40' N, relationships of the mass formation and spatial spread of the light rings with the Volcanic Explosivity Index (VEI) are revealed. The eruptions with VEI = 6 and higher statistically differ from weaker ones by the amount of light rings and their spatial distribution. The doubtful dates of several strong eruptions are discussed.

Keywords: Siberian forest-tundra, larch, light rings, volcano eruption, VEI.