ИЗВЕСТИЯ РАН. СЕРИЯ ГЕОГРАФИЧЕСКАЯ, 2021, том 85, № 1, с. 84–96

ЭВОЛЮЦИЯ ПРИРОДНЫХ СИСТЕМ

УДК [581.824.1-247.5:581.151]:551.585(212.3:571.1/.5)

ХРОНОЛОГИИ СВЕТЛЫХ КОЛЕЦ ЛИСТВЕННИЦЫ НА СЕВЕРЕ СИБИРСКОЙ ЛЕСОТУНДРЫ: ОТРАЖЕНИЕ СТЕПЕНИ КОНТИНЕНТАЛЬНОСТИ КЛИМАТА

© 2021 г. М. А. Гурская*

Институт экологии растений и животных УрО РАН, Екатеринбург, Россия

**e-mail: mgurskaya@yandex.ru*

Поступила в редакцию 29.03.2020 г.
После доработки 08.09.2020 г.
Принята к публикации 30.10.2020 г.

У представителей рода *Larix*, произрастающих на 18 точках лесотундры Сибири на профиле длинной 4000 км, выявлены светлые годичные кольца. В хронологиях по светлым кольцам за период, обеспеченный метеорологическими наблюдениями (1944–1992), есть группа общих лет по Западной Сибири и западной части Средней Сибири, вторая группа общих лет приурочена к восточной части Средней Сибири, третья находится в Восточной Сибири. Повсеместно формирование светлых колец связано с низкой температурой вегетационного периода, а именно июня, июля и августа. Впервые выявлены различия в климатическом сигнале у светлых колец у лиственницы из различных географических районов Сибирской Субарктики. В Западной Сибири основное влияние на формирование светлых колец оказывают температуры конца вегетационного сезона (августа), а в восточной – температуры начала вегетации (июня). Различия в температурном отклике хронологий по светлым кольцам обусловлены повышением температуры июня и соответствующим увеличением континентальности климата с запада на восток. Выявлены группы светлых колец хронологий со сходным сигналом, которые делят Сибирскую Субарктику на пять крупных районов. Эти группы согласуются с группами древесно-кольцевых хронологий, выделенными для региона ранее.

Ключевые слова: северная лесотундра, Сибирь, лиственница, светлые кольца, континентальность, температура

DOI: 10.31857/S2587556621010064

ВВЕДЕНИЕ

Климатические условия в лесотундровой зоне Сибири изменяются в направлении с запада на восток. Температуры зимних месяцев по мере роста континентальности становятся ниже, а летних – выше, что ведет к увеличению амплитуды годовой температуры [13]. Перераспределение тепла в течение года в долготном направлении обусловливает изменение в составе и структуре биологических сообществ [27], в распространении видов деревьев [12], в динамике их годичного прироста [2]. В высоких широтах увеличение континентальности климата в долготном направлении накладывается на короткие вегетационные сезоны, в результате чего условия окружающей среды становятся еще более экстремальными для всей биоты и древесной растительности, в частности.

Изучение экстремальных погодных и климатических явлений является одним из приоритетных направлений современных исследований изменений климата [19]. Однако анализ частоты и последствий неблагоприятных условий в течение вегетации затруднен в связи с относительной редкостью подобных явлений в прошлом. Один из способов изучения климатических экстремумов – исследование их с помощью природных регистрирующих структур, например годичных колец деревьев.

Ширина годичных колец – один из наиболее популярных в дендрохронологии параметров для изучения динамики климата в прошлом [4, 26]. В рамках Сибирского субарктического дендроклиматического проекта (ССДП) выполнены дендроклиматические реконструкции, основанные на ширине и плотности годичных колец [4]. Авторами проекта выполнен детальный анализ радиального прироста хвойных деревьев, произрастающих на северной границе распространения в Сибирской лесотундре. Но ширина годичных колец, являясь интегральной характеристикой климатических условий вегетационного сезона, содержит мало информации о краткосрочных неблагоприятных природных явлениях. Строение клеток

и тканей годичного кольца отражает условия окружающей среды в периоды их формирования, особенно экстремальные природные условия в период формирования годичного кольца [3, 16, 26]. Анатомическое строение годичных колец обладает более высокой разрешающей способностью в несколько недель или даже часов [3, 8, 14, 20].

Короткое или холодное лето является характерным экстремальным климатическим явлением в высоких широтах. В экосистемах лесотундры такие условия вегетационного сезона часто приводят к тому, что формирование годичного кольца и/или развитие стенок поздних трахеид остается незаконченным [8, 14, 15, 25] и в результате образуются светлые кольца. Они характеризуются светлой окраской зоны поздней древесины по сравнению с соседними годичными кольцами, связанной с низкой плотностью и слабой лигнификацией стенок трахеид [20]. В древесине деревьев, произрастающих на северном пределе распространения в Сибири, светлые кольца встречаются довольно часто и имеют климатическую причину формирования [7]. Светлые кольца у лиственницы, произрастающей в северных лесотундровых экосистемах, характеризуются узкой зоной поздней древесины вплоть до полного ее отсутствия или широкой зоной поздней древесины с тонкостенными поздними трахеидами [8].

Связи между радиальным приростом и долготным градиентом температуры были выявлены для основных видов лесообразователей в Канаде, на территории Фенноскандии и в Западной Сибири [2, 21, 22]. Предыдущие исследования в Западной Сибири показали, что при движении с запада на восток происходит рост связи ширины годичного кольца ели с климатическими факторами и увеличение статистических коэффициентов у древесно-кольцевых хронологий лиственницы [2].

Для хронологий по светлым кольцам у ели и лиственницы, произрастающих в Западной Сибири, при движении с запада на восток не выявлено изменений в частоте, интенсивности и климатическом сигнале, а различия обусловлены местными условиями произрастания [2]. Это может быть связано с относительно однородными климатическими условиями по всему северу Западной Сибири.

Влияние долготного градиента континентальности на формирование светлых годичных колец для всей субарктической области Сибири до сих пор не изучено. Целью данной работы является выявление динамики климатического сигнала в хронологиях светлых колец в древесине представителей рода *Larix*, произрастающих на северном пределе распространения вдоль долготного профиля северной лесотундры Сибири.

РАЙОН, МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Климатические условия

Район исследования находится в субарктическом регионе Сибири, в зоне северной лесотундры между 66° с.ш. и 72° с.ш. и между 66° в.д. и 168° в.д. Основными климатообразующими факторами здесь являются характер атмосферной циркуляции, неоднородность подстилающей поверхности в холодное и теплое время года и неравномерность поступления солнечной радиации в течение года. В начале вегетационного сезона продолжительность поступления солнечной радиации достигает 24 ч в сутки. На формирование климата севера Сибири оказывает влияние проникновение в течение всего года холодного арктического воздуха на континент. Относительно большое количество осадков наблюдается на всей Западной Сибири до середины Средней Сибири (р. Котуй). Осадки обусловлены проникновением атлантических воздушных масс. Восточнее р. Котуй и на севере Восточной Сибири термический режим обусловлен больше радиационными, а не циркуляционными факторами. Особенностью климата Восточной Сибири является высокая испаряемость снега до перехода суточной температуры через 0°C [6].

Для Сибирской Субарктики наиболее холодным месяцем года является январь, температура воздуха опускается в среднем до –32°C. Самый теплый месяц – июль, средняя температура составляет около 13°C. Почвы – глеевые и глеево-подзолистые, распространена вечная мерзлота, глубина сезонно-талого слоя уменьшается с 3 м на западе до 1.5 м на востоке. Вегетационный сезон короткий, не превышает двух месяцев, осадки приурочены к теплой половине года, за июль–август выпадает до 50% осадков. Спорадические заморозки возможны в течение всего вегетационного периода [6].

Краткая характеристика видов лиственниц в северной лесотундре Сибири

Род *Larix* – абсолютный доминант в мерзлотной зоне Сибири. Лиственничные леса, редколесья и редины выполняют важные средообразующие и защитные функции, а виды лиственницы являются главными эдификаторами растительных сообществ и депонентами углерода на севере Сибири. Основными среди них, образующих северный предел распространения лесной растительности в высоких широтах Сибири, являются лиственница сибирская (*L. sibirica* Ledeb.), лиственница Гмелина (даурская) (*L. gmelinii* (Rupr.) Rupr.) и лиственница Каяндера (*L. cajanderi* Mayr) [1].

Лиственница сибирская – наиболее распространенный вид в Западной Сибири – участвует в образовании северных лесных островов, форми-

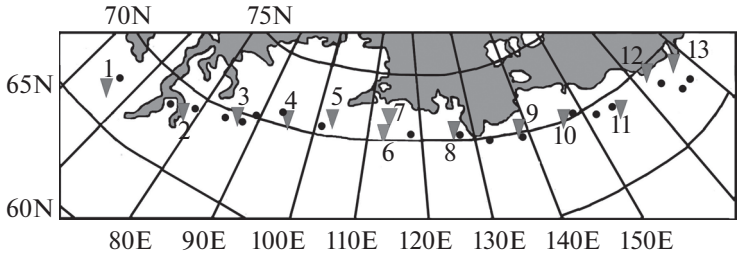

Рис. 1. Район исследований. Точки – места отбора образцов, треугольники – метеостанции; номера соответствуют коду метеостанции (см. табл. 2).

руя в них чистые древостои. Тяготеет к хорошо дренированным и аэрированным относительно теплым почвам, чувствительна к вечной мерзлоте, по сравнению с *L. gmelinii*, с которой имеет общую границу ареала. В молодом возрасте *L. sibirica* может выносить значительное затенение, произрастая под пологом сомкнутых древостоев, уступает эдификаторную роль *L. gmelinii* в зоне контакта их ареалов [9].

Лиственница Гмелина – основная лесообразующая порода Севера Средней Сибири – в зоне многолетней мерзлоты образует типичные для региона леса и редколесья. Предельного возраста достигает в экстремальных условиях, а на климатическом пределе может возобновляться и вегетативным путем. По светолюбию превосходит *L. sibirica*, а по устойчивости к континентальности климата она близка к *L. cajanderi* [1, 10]. Благополучно переносит крайне низкие зимние температуры воздуха, устойчива к низким температурам почвы и длительному промораживанию корневых систем. В мерзлотной зоне формирует корневую систему поверхностного типа, с придаточными корнями [1].

Лиственница Каяндера на большей части ареала образует типичные для Северо-Восточной Сибири редколесья и редины. Вид не требователен к теплу, хорошо переносит длительные и крайне низкие зимние температуры воздуха, устойчив к низким положительным температурам почвы и зимнему промораживанию корневых систем. Формирует поверхностную корневую систему с придаточными корнями в верхнем 30–40 см слое почвы. Произрастает как на каменистых осыпях, так и на перегнойно-карбонатных и подзолистых почвах, а также аллювиальных почвах речных долин [10, 11].

Сбор и обработка материала

Долготный профиль в Сибирской Субарктике был разделен на: (1) Западную Сибирь, находящуюся в пределах Западно-Сибирской низменности, (2) Среднюю Сибирь, занимающую все Средне-Сибирское плоскогорье и (3) Восточную Сибирь – в пределах Яно-Колымского нагорья.

Буровые образцы (керны) с разных видов лиственницы (*Larix sibirica, L. gmelinii*, *L. cajanderi*) собраны соответственно на долготном профиле в лесотундре на 18 точках, находящихся на расстоянии 250–500 км друг от друга (табл. 1), – по 20–50 кернов на каждой точке. Поверхность кернов была зачищена, образцы перекрестно датированы с использованием программ TSAP [23] и COFECHA [18], чтобы установить точный год образования светлых колец. Длина полученных хронологий колеблется от 69 до 690 лет, составляя в среднем 450 лет. В последующем анализе был использован только общий период, обеспеченный данными наблюдений метеорологических станций (1944–1992).

Светлые кольца визуально выявляли путем сравнения с прилежащими годичными кольцами [7, 14–16] на зачищенной поверхности керна в отражающем свете микроскопа при увеличении 20–40×. Хронологии встречаемости светлых колец построены с помощью процедуры нормализации данных, на основе расчета доли светлых колец в зависимости от общего числа годичных колец в каждый календарный год.

Данные по средней месячной температуре 13 метеорологических станций, располагающихся в Сибирской Субарктике в этих же широтах (табл. 2) и относительно близко от точек сбора образцов (рис. 1), использованы для установления корреляционной связи между хронологиями светлых колец и средней месячной температурой воздуха [5]. Последующая кластеризация хронологий выполнена в программе *Statistica8.0* на основе значений коэффициентов корреляции за 12 мес. методом простого объединения на основе евклидовых расстояний.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Климатические условия по данным метеостанций

Согласно наблюдениям метеостанций, расположенных вдоль профиля, температура июня в

Таблица 1. Координаты и характеристики точек сбора материалов

Код хронологии	Широта	Долгота	Высота над ур. м., м	Вид	Начальный год	Длина хронологии	Число кернов
Западная Сибирь							
1	67°33′	67°32′	35	*L.s.*	1940	69	25
2	67°28′	76°46′	20	*L.s.*	1561	430	25
3	68°08′	79°46′	30	*L.s.*	1562	429	18
4	68°07′	85°03′	50	*L.s.*	1553	438	20
Средняя Сибирь							
5	69°23′	86°13′	20	*L.s*	1925	85	21
6	70°31′	89°30′	70	*L.s.*	1615	376	20
7	71°20′	93°50′	70	*L.g.*	1540	451	24
8	72°27′	101°45′	20	*L.g.*	1644	347	20
9	71°42′	118°35′	80	*L.g.*	1600	391	23
10	71°06′	127°17′	70	*L.g.*	1425	567	22
Восточная Сибирь							
11	70°57′	132°59′	20	*L.c.*	1518	474	21
12	70°15′	138°10′	80	*L.c.*	1301	691	22
13	70°30′	148°08′	20	*L.c.*	1425	670	21
14	69°28′	152°06′	30	*L.c.*	1414	581	26
15	69°17′	154°46′	50	*L.c.*	1412	580	22
16	68°48′	163°03′	300	*L.c.*	1468	524	29
17	67°12′	165°06′	470	*L.c.*	1568	424	20
18	67°28′	167°40′	450	*L.c.*	1420	572	20

Примечание: *L.s.* – *Larix sibirica*, *L.g.* – *L. gmelinii*, *L.c.* – *L. cajanderi*.

Таблица 2. Характеристики мест расположения и период наблюдений метеорологических станций

№	Название станции	Широта	Долгота	Высота над ур. м., м	Период наблюдений
1	Салехард	66°31′	66°36′	15	1882–2017
2	Тазовск	67°30′	78°42′	8	1937–2017
3	Дудинка	69°24′	86°10′	16	1906–2017
4	Волочанка	70°58′	94°30′	37	1936–2017
5	Хатанга	71°58′	102°28′	30	1929–2017
6	Жилинда	70°6′	113°54′	62	1936–2017
7	Саскылах	72°0′	114°6′	18	1936–2017
8	Кюзюр	70°40′	127°24′	36	1912–2017
9	Юбилейная	70°45′	136°13′	25	1935–2017
10	Чокурдах	70°36′	147°54′	61	1945–2017
11	Среднеколымск	67°27′	153°41′	20	1887–2017
12	Островное	68°7′	164°10′	25	1940–2017
13	Илирней	67°9	167°34′	352	1944–2017

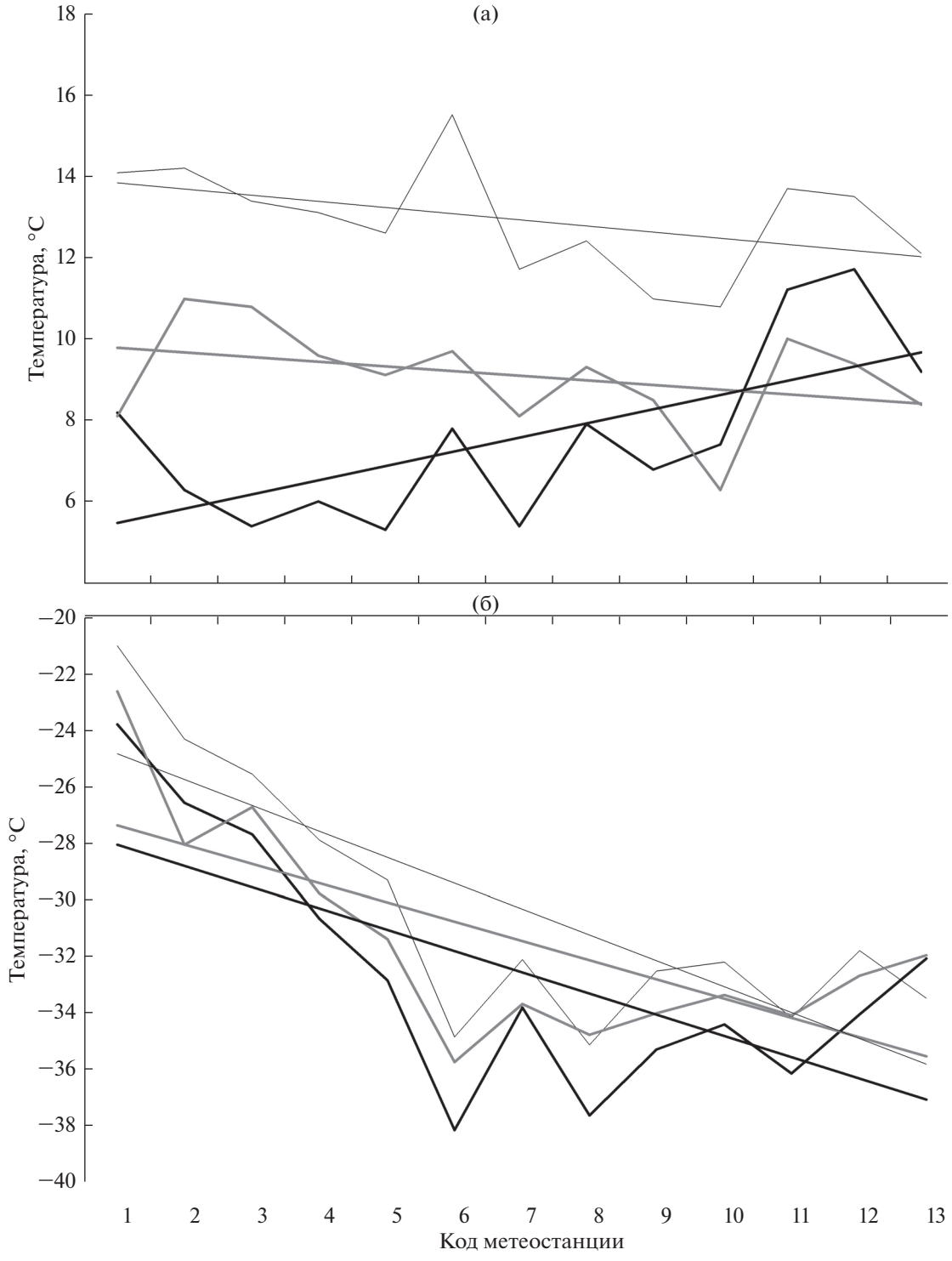

Рис. 2. Ход температуры и тренды летнего (а) и зимнего (б) периодов: июнь и январь (черная линия), июль и февраль (темно-серая линия), август и декабрь (светло-серая линия).

среднем составляет 7.5°С. На станциях 11–13 температура июня становится выше 9°С, без этих трех станций средняя температура июня на профиле – 6.4°С (рис. 2а). Температура июля достигает в среднем 12.9°С, августа – 9.1°С, а средняя температура июня–августа составляет 9.4°С. Температура июня повышается в восточном направлении в среднем на 1°С. Температура июля и августа понижается по профилю с запада на восток на 3 и 1.8°С соответственно.

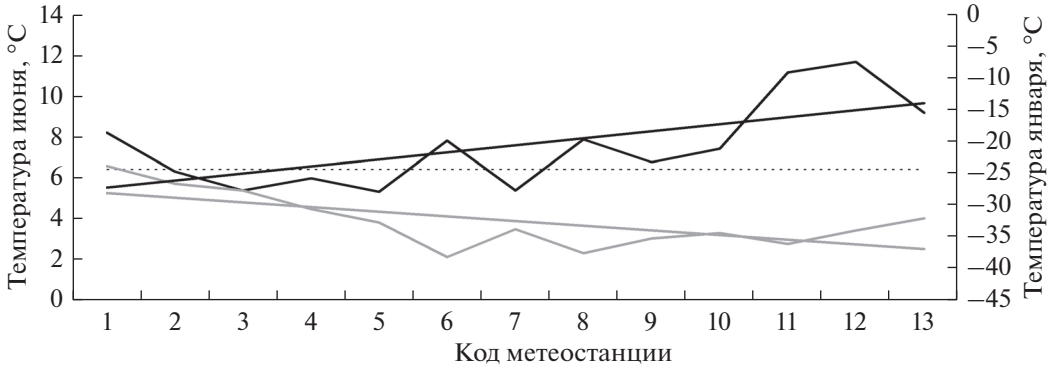

Рис. 3. Амплитуда температуры января (серая линия) и июня (черная линия). Пунктирная линия – средняя температура июня (без станций 11–13).

Самый холодный месяц – январь, средняя температура –32°С, а декабря и февраля –30°С и –31°С соответственно. Температура декабря по профилю с запада на восток опускается в среднем на 11°С, января и февраля на 10°С (рис. 2б).

Континентальность климата растет с запада на восток. Годовая амплитуда температуры самого холодного и самого теплого месяцев (январь/июнь) составляет в среднем 40°С, изменяясь от 32°С в западной части профиля до 47°С в восточной части профиля (рис. 3).

Хронологии светлых колец

Все изученные виды лиственниц формируют светлые кольца, хотя их выраженность и частота по профилю изменчивы. В Западной Сибири чаще формируются светлые кольца с тонкостенной поздней древесиной, в Восточной Сибири – с узкой зоной поздней древесины (рис. 4). В Средней Сибири светлые кольца чаще имеют широкую зону поздней древесины, в районе 100°–120° в.д. с одинаковой частотой формируются кольца с широкой и узкой зонами поздней древесины, а после 120° в.д. – чаще с тонким слоем поздней древесины. Иногда отмечались годы, когда в один и тот же год на одной и той же точке формировались оба варианта строения светлых колец.

Количество лет, когда происходило формирование светлых колец, варьирует от 4 до 10 за рассматриваемый 47-летний период (табл. 3).

На территории Западной Сибири лет со светлыми кольцами выявлено больше всего, в среднем около 9 лет за рассматриваемый период. Выделяются общие годы по всему северу Западной Сибири – 1944, 1958, 1964, 1968 гг. В Средней Сибири количество лет со светлыми кольцами постепенно убывает с 8 до 4–5 в восточной части, где после 101° в.д. выявлен всего один общий год – 1989 г. Однако если рассмотреть группу хронологий до 101° в.д. (р. Котуй), то общих лет в западной части Средней Сибири становится больше (1944, 1958, 1968, 1989 гг.). На севере Восточной Сибири количество лет со светлыми кольцами в среднем составляет 6 лет, количество общих лет невелико: 1962 и 1984 гг. Общих лет со светлыми кольцами для всего долготного профиля в Сибири не найдено (см. табл. 3).

Климатический отклик

Корреляционный анализ показал отрицательные связи между температурой воздуха летних месяцев и хронологиями светлых колец, а с остальными месяцами года связей не выявлено. Корреляция хронологий по светлым кольцам с температурой июня остается постоянной на протяжении всего профиля, становясь незначимой в самом начале (хронология 1) и в конце профиля (хронологии 16–18). Статистически достоверные высокие коэффициенты корреляции с июльскими температурами выявлены у трех хронологий, расположенных в центральной части профиля в районе р. Лена. Корреляция с температурой августа, имея высокие значения в Западной Сибири, становится не значимой после 101° в.д. (хронология 9). Исключение составляют три последние точки профиля (16–18), в их хронологиях не выявлен температурный сигнал вегетационного сезона.

Выявлено, что 66% значимых корреляций между хронологиями светлых колец и температурой воздуха получено для июня, 33% – для июля и 44% – для августа. Большинство достоверных корреляций с температурой июня отмечено на севере Западной Сибири (75% хронологий имеют корреляцию с июнем), меньше – на севере Средней (67%) и еще меньше на севере Восточной (62%). Количество значимых корреляций по температуре июля – 25, 16 и 50% соответственно. Количество хронологий по светлым кольцам со значимыми корреляциями с температурой августа

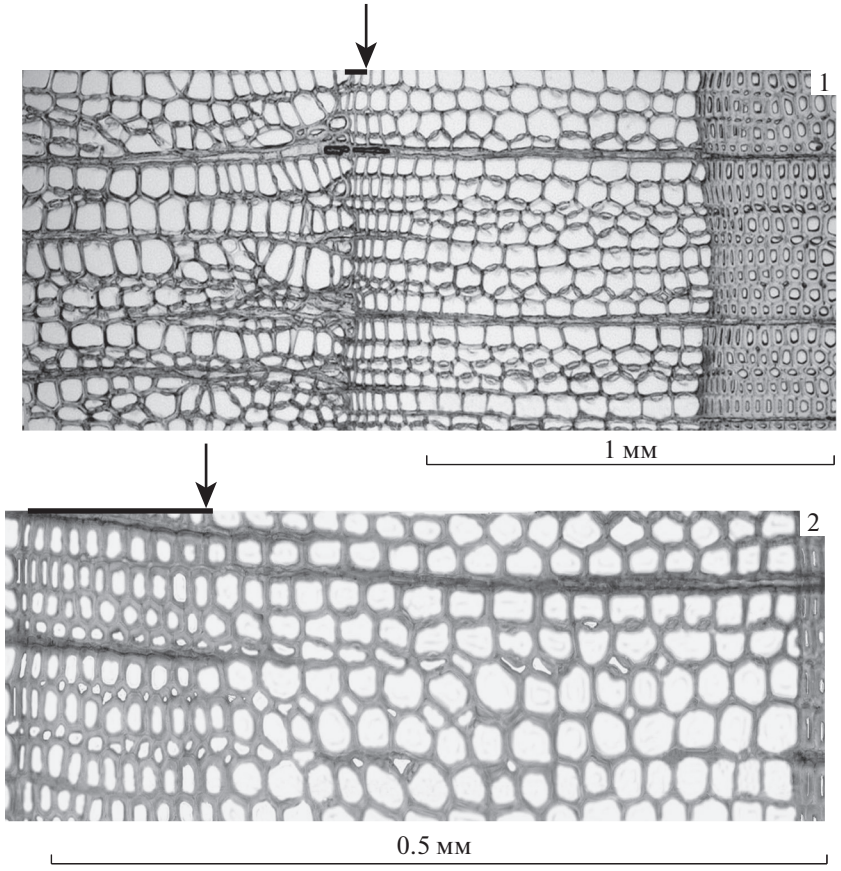

Рис. 4. Основные проявления светлых колец у лиственницы в Сибирской Субарктике. Стрелка указывает на начало поздней древесины. Увеличение ×400.

составляет 100% для лиственниц Западной, 66% – Средней и 0% – Восточной Сибири.

Таким образом, хронологии светлых колец у лиственниц, произрастающих в Западной Сибири и в Средней Сибири, имеют достоверную отрицательную корреляцию с температурами июня и августа и редко с температурой июля. У хронологий на севере Восточной Сибири достоверными являются корреляции июня и июля (рис. 5).

На основе анализа климатического отклика все использованные в работе хронологии светлых колец можно объединить в несколько групп. Хронологии Западной Сибири (1–3) образуют одну группу, а наиболее удаленная группа состоит из хронологий лиственницы, произрастающей на севере Восточной Сибири (16–18). Хронологии 1–3 локализуются в районе Обской губы и характеризуются связями с августом и июнем. Следующая группа хронологий (4–6) приурочена к бассейну р. Енисей, по коэффициенту корреляции с июнем и августом сходна с группой 1–3, а так же годами, когда формируются светлые кольца у лиственницы. Группа хронологий 8–10 приурочена к плато Путорана и характеризуется корреляциями с июнем и июлем и незначимыми корреляциями с августом. Хронологии 11–15 образуют кластер севера Восточной Сибири с корреляцией с температурой июня. Хронологии 7 и 14 попадают в группы географически удаленных кластеров: хронология 7 (Средняя Сибирь) находится в группе 11–15 (Восточная Сибирь), а хронология 14 (Восточная Сибирь) – в кластере 8–10 (плато Путорана) (рис. 6).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В высоких широтах Сибири с продвижением с запада на восток увеличивается континентальность климата, температура января понижается, а температура июня увеличивается. Воздушные массы с Атлантического океана способствуют формированию в Западной Сибири более влажного и менее континентального климата по сравнению с севером Восточной Сибири [6]. Более теплый июнь, отмеченный в восточной части профиля, предполагает либо более раннее начало периода вегетации, либо более интенсивные процессы камбиального деления у деревьев вследствие высокой температуры воздуха. С другой стороны, отмеченное понижение температуры воздуха в августе в восточной части Сибири ведет

Таблица 3. Годы формирования светлых колец в древесине лиственницы

Год	Точка																	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1944	+	+	+	+	+	+	+	+			+	+						
1945												+				+		
1946		+					+											
1949			+			+										+		
1951		+	+														+	+
1952		+					+					+						
1954					+			+							+	+		
1956			+	+											+			
1957										+		+	+			+	+	
1958	+	+	+	+	+	+	+	+										
1961			+					+										
1962										+	+	+	+	+	+	+	+	+
1964	+	+	+	+	+					+								
1968	+	+	+	+	+	+	+											+
1969	+			+														
1970	+			+	+	+		+	+								+	
1972														+	+	+		
1975	+						+											
1977					+											+	+	
1978	+			+					+		+		+	+	+			
1979													+	+	+	+		
1980	+	+		+	+						+							
1982	+													+				+
1984									+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
1985							+	+										
1987	+															+		
1989					+	+	+	+	+	+								
СК 1/2	0/11	3/5	1/7	2/7	1/8	4/2	6/3	3/4	2/2	4/1	4/1	6/0	4/1	6/0	5/2	9/1	5/1	6/0

Примечания. 1–18 – код хронологии. Серым цветом выделены общие годы для Западной, Средней и Восточной Сибири. "+" – год, в котором формировались светлые кольца; "СК 1/2" – соотношение в образцах точки отбора керна светлых колец 1 и 2 типов соответственно.

к уменьшению продолжительности вегетационного сезона. Таким образом, согласно имеющимся метеорологическим данным, вегетационный сезон на севере Восточной Сибири может начинаться несколько раньше и заканчиваться раньше по сравнению с высокими широтами Западной Сибири. Зимние температуры воздуха, скорее всего, не оказывают существенного влияния на формирование годичных колец.

Светлые кольца формируются на всей территории сибирской лесотундры, частота их формирования примерно одинакова за рассматриваемый период, следовательно, частота экстремальных климатических явлений, ведущих к их формированию, за изученный период остается здесь постоянной.

Светлые кольца имеют разную степень проявления: в Западной Сибири чаще формируются светлые кольца с широкой зоной поздней древесины с тонкостенными трахеидами, такие кольца образуются при условии благоприятной температуры в период деления клеток камбия и последующего растяжения, что соответствует теплому июню и июлю [3, 4]. В период созревания поздних трахеид температура воздуха опускается ниже определенных пороговых значений в годы формирования светлых колец. В результате чего процессы утолщения вторичной клеточной стенки замедляются или останавливаются. Этот меха-

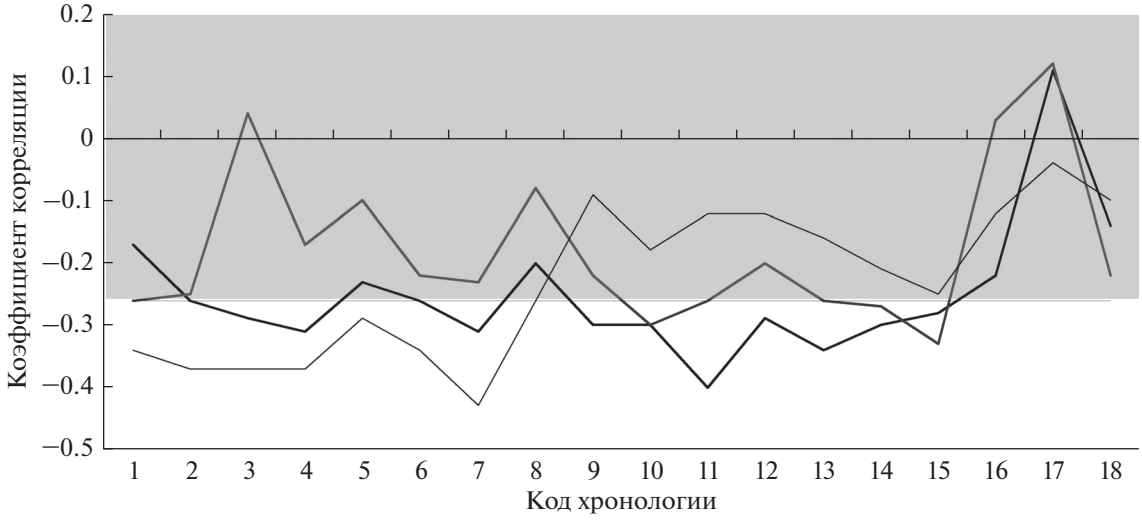

Рис. 5. Корреляции между температурой июня (черная линия), июля (серая линия) и августа (черная тонкая линия) и хронологиями светлых колец. Заливка серым – статистически недостоверные значения, на белом фоне – значимые коэффициенты, $p < 0.05$. 1–18 – точки отбора образцов (см. рис. 1).

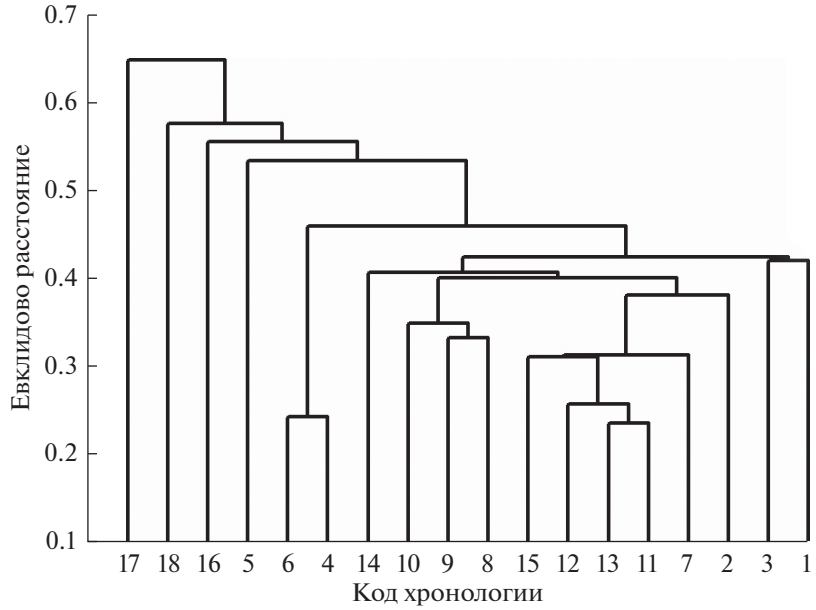

Рис. 6. Кластерный анализ коэффициентов корреляции хронологий светлых колец лиственницы с температурой воздуха в сибирской лесотундре. 1–18 – точки отбора образцов (см. рис. 1).

низм формирования светлых колец подтверждается полученными корреляциями с температурой воздуха: в западной части профиля температура августа является одним из основных факторов, влияющих на формирование светлых колец. Температура августа имеет пороговое значение в пределах 9°С, ниже которого погодные условия августа способствуют формированию светлых колец [16]. Это пороговое значение температуры достигается в районе 100°–110° в.д., далее на восток наблюдается понижение средней месячной температуры августа ниже 9°С. Так как на севере Восточной Сибири температура августа ниже 9°С, то в таких условиях формирование слоя прироста в августе не происходит.

Несмотря на многочисленные свидетельства, что на формирование светлых колец в высоких широтах в основном влияют температуры конца вегетационного сезона [14, 16, 26, 27], в Сибирской Субарктике выявлены связи между формированием светлых колец и температурой июня. В

западной части профиля связи хронологий по светлым кольцам с температурой июня отмечаются редко, однако после 101° в.д. (точка 8) связи выявляются на каждом местообитании.

Светлые кольца у лиственницы, произрастающей от 101° в.д., характеризуются преобладанием колец с тонкой зоной поздней древесины, вплоть до полного ее отсутствия. Следовательно, период, когда камбий откладывает материнские клетки поздних трахеид, становится экстремально коротким, несмотря на последующее достаточное время на созревание вторичной стенки поздней древесины. Однако не исключено, что август в Восточной Сибири также является холодным в годы формирования светлых колец.

В западной части профиля июнь достаточно холодный и, скорее всего, мало влияет на пролиферацию клеток ксилемы, так как годичный прирост в Западной Сибири зависит в основном от температуры июля и значительно меньше от температуры июня. Увеличение влияния температуры июня с продвижением на восток показано в исследованиях ширины годичного кольца [4]. У древесно-кольцевых хронологий лиственницы, произрастающей в восточной части профиля, растет корреляция с температурой июня и уменьшается с температурой июля. Это связано с ростом вдоль градиента температуры июня выше 8°С и смещением сроков начала вегетации на июнь.

Холодный июнь в восточной части профиля означает либо задержку вегетационного сезона, либо длительное похолодание и даже поздние весенние заморозки после инициации роста. В результате происходит существенное уменьшение вегетационного сезона, которое достигает критических значений именно на востоке Сибири [4].

В самой восточной части профиля три последних хронологии профиля не имеют связей с температурой воздуха. В настоящий момент этот факт трудно объяснить, однако древесно-кольцевые хронологии также не имеют связей с температурой летних месяцев [4]. В районе требуются дополнительные исследования условий роста лиственницы.

На основе анализа отклика ширины годичного кольца на температуру летних месяцев в Урало-Сибирской Субарктике ранее были выделены пять районов – Западно-Сибирский, Таймырский, Анабарский, Яно-Колымский и Анюйский [4]. В пределах этих районов связи радиального прироста лиственницы и температуры являются сходными. В Западно-Сибирском районе ширина годичных колец связана в основном с температурой июля. В Таймырском районе кроме корреляции с июльской температурой отмечено появление значимых коэффициентов функций отклика с июнем. Далее на восток, в Анабарском районе, хронологии по ширине колец имеют сигнал июня и частично июля. Яно-Колымский район характеризуется устойчивыми связями ширины годичных колец и температуры июня, а влияние июльских температур не выявлено. Анюйский район отличается отсутствием тесных связей с летними температурами [4].

Результаты этой работы показывают, что не только ширина кольца, но и отклик хронологий светлых колец на температуру летних месяцев позволяют выделить эти же физико-географические районы. Группа хронологий 1–3 соответствует Западно-Сибирскому; 4–6 – Таймырскому; 8–10 – Анабарскому; 11–15 – Яно-Колымскому и 16–18 – Анюйскому районам.

Динамика отклика как радиального прироста, так и светлых колец на температуру обусловлена особенностями атмосферной циркуляции в этих районах. Западно-Сибирский и Таймырский район находятся под влиянием воздушных масс Атлантического океана с большим количеством осадков во второй половине вегетации – в июле и августе. Далее на восток (Анабарский и Яно-Колымский районы) наблюдается сублимация снежного покрова в весенний период, уменьшение общего количества осадков и увеличивается значение региональной циркуляции и радиационного охлаждения атмосферы [6].

Предыдущие исследования климатического сигнала в долготном градиенте температуры на территории Западной Сибири показали, что хронологии светлых колец на расстоянии около 600 км имеют общий климатический сигнал и не показывают изменения континентальности климата на таком расстоянии [7]. Это может быть связано с тем, что в Западной Сибири хронологии светлых колец принадлежат одному кластеру на основании коэффициентов корреляции с температурой воздуха. Следовательно, хронологии светлых колец на относительно небольшом расстоянии по сравнению с древесно-кольцевыми хронологиями менее чувствительны к континентальному градиенту температуры.

ВЫВОДЫ

Светлые кольца у лиственницы формируются повсеместно в северной лесотундре Сибири в ответ на экстремально короткое или холодное лето. С продвижением на восток изменяются морфолого-анатомические характеристики светлых колец: в Западной Сибири чаще формируются светлые кольца с широкой зоной поздней древесины, в Восточной Сибири – с узкой поздней древесиной. В Западной Сибири основным периодом, влияющим на формирование светлых колец, будет окончание вегетационного периода (август), в Восточной Сибири – начало вегетации (июнь). Выявлена постепенная смена климатического

сигнала летних месяцев в светлых кольцах лиственницы в связи с увеличением континентальности климата. Выявлены группы хронологий со сходным климатическим сигналом, которые делят Сибирскую Субарктику на пять крупных районов. Есть группа хронологий светлых колец на самом востоке Сибири, у которой не выявлены связи с температурой.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (проект № 20-05-00569) и государственного задания Института экологии растений и животных УрО РАН № АААА-А19-119031890086-0.

FUNDING

The work was partially financially supported by the Russian Foundation for Basic Research (project no. 20-05-00569) and the state-ordered research theme of the Institute of Plant and Animal Ecology of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (no. АААА-А19-119031890086-0).

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает благодарность членам международной экспедиции 1991–1992 гг. проекта ССДП за сбор образцов древесины.

ACKNOWLEDGMENTS

The author expresses his deep gratitude to members of the 1991–1992 international expedition of Siberian Subarctic Dendrochronological Project for collecting of wood samples.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Абаимов А.П., Бондарев А.И., Зырянова О.А., Шитова С.А.* Леса Красноярского Заполярья. Новосибирск: Наука. Сиб. предприятие РАН, 1997. 208 с.
2. *Агафонов Л.И., Гурская М.А.* Влияние долготного градиента температур на радиальный прирост основных лесных пород северо-западной Сибири // Изв. РАН. Сер. геогр. 2012. № 5. С. 48–60.
3. *Антонова Г.Ф.* Рост клеток хвойных. Новосибирск: Наука, 1999. 232 с.
4. *Ваганов Е.А., Шиятов С.Г., Мазепа В.С.* Дендроклиматические исследования в Урало-Сибирской Субарктике. Новосибирск: Изд. фирма СО РАН, 1996. 246 с.
5. *Булыгина О.Н., Разуваев В.Н., Трофименко Л.Т., Швец Н.В.* Описание массива данных среднемесячной температуры воздуха на станциях России. Всерос. научно-исслед. ин-т гидромет. информации. http://meteo.ru/data/156-temperature#описание-массива-данных
6. *Голубчиков Ю.Н.* География горных и полярных стран. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1996. 304 с.
7. *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.
8. *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 // Бот. журн. 2013. № 98 (8). С. 103–120.
9. *Дылис Н.В.* Лиственница. Библиотечка “Древесные породы”. М.: Лесн. промышленность, 1981. 96 с.
10. *Поздняков Л.К.* Даурская лиственница. М.: Наука, 1975. 153 с.
11. *Тихомиров В.Н., Коропачинский И.Ю., Фалалеев Э.Н.* Лиственничные леса Сибири и Дальнего Востока. М.–Л.: Гослесбумиздат, 1961. 164 с.
12. *Chytry M., Danihelka J., Kubešova S., Lustyk P., Ermakov N., Hajek M., Hajkova P., Koči M., Otypkova Z., Roleček J., Řezníčkova M., Šmarda P., Valachovič M., Popov D., Pišut I.* Diversity of forest vegetation across a strong gradient of climatic continentality: Western Sayan Mountains, southern Siberia // Plant Ecology. 2008. № 196. P. 61–83.
13. *Driscoll D.M., Fong J.M.Y.* Continentality: a basic climatic parameter re-examined // Int. J. Climatol. 1992. № 12. P. 185–192.
14. *Filion L., Payette S., Gauthier L., Boutin Y.* Light rings in sub-arctic conifers as a dendrochronological tool // Quat. Res. 1986. № 26. P. 272–279.
15. *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. № 36. P. 5–11.
16. *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 Ecol. 2019. № 50 (4). P. 343–351.
17. *Gurskaya M.A., Hallinger M., Eckstein D., Wilmking M.* Extreme cold summers in Western Siberia derived from light rings of conifers // Phyton. 2012. № 52 (1). P. 101–119.
18. *Holmes R.L.* Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement // Tree-Ring Bulletin. 1983. № 43. P. 69–78.
19. *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation*. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Field C.B., Barros V., Stocker T.F., et al., Eds. Cambridge: University Press, 2012. 582 p.
20. Kaennel M., Schweingruber F.H. *Multilingual Glossary of Dendrochronology. Terms and Definitions in English, German, French, Spanish, Italian, Portuguese, and Russian*. Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research, Ed. Bern: Haupt, 1996. 467 p.
21. *Linderholm H.W., Solberg B.O., Lindholm M.* Tree-ring records from central Fennoscandia: the relationship between tree growth and climate along a west–east transect // The Holocene. 2003. № 13 (6). P. 887–895.
22. *Miyamoto Y., Griesbauer H.P., Green D.S.* Growth responses of three coexisting conifer species to climate across wide geographic and climate ranges in Yukon

and British Columbia // For. Ecol. Manage. 2010. № 259. P. 514–523.

23. *Rinn F.* TSAP Time Series Analysis and Presentation. Ver. 3.0. Reference Manual. Heidelberg, Germany: Frank Rinn Distribution, 1996. 262 p.
24. *Rossi S., Deslauriers A., Gricar J., et al.* Critical temperatures for xylogenesis in conifers of cold climates // Glob. Ecol. Biogeogr. 2008. № 17. P. 696–707.
25. *Szeicz J.M.* White spruce light rings in northwestern Canada // Arctic and Alpine Res. 1996. № 28 (2). P. 184–189.
26. Vaganov E.A., Hughes M.K., Shashkin A.V. *Growth Dynamics of Conifer Tree Rings: Images of Past and Future Environments*. Ecological Studies, vol. 183. Springer, 2006. 356 p.
27. *Van Der Veken S., Bossuyt B., Hermy M.* Climate gradients explain changes in plant community composition of the forest understory: an extrapolation after climate warming // Belgian J. of Botany. 2004. № 137 (1). P. 55–69.
28. *Wang L., Payette S., Bégin Y.* A quantitative definition of light rings in black spruce (*Picea mariana*) at the arctic treeline in northern Quebec, Canada // Arctic, Antarctic and Alpine Res. 2000. № 32. P. 324–330.
29. *Yamaguchi D.K., Filion L., Savage M.* Relationship of temperature and light ring formation at subarctic treeline and implications for climate reconstruction // Quat. Res. 1993. № 3. P. 256–262.

Chronology of Larch Light Rings in the North of Siberia: Reflection of the Climate Continentality Degree

M. A. Gurskaya*

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

**e-mail: mgurskaya@yandex.ru*

Larches form light rings on 18 study sites at the Siberian forest-tundra on 4000 km long profile. The chronologies of the light rings were built for the period provided by meteorological observations (1944–1992). One group of common years with light rings was found for area of Western Siberia and the western part of Central Siberia. The second group of common years is confined to the eastern part of Central Siberia. The third group is in Eastern Siberia. The formation of light rings is associated with a low temperature of June, July, and August. Differences in the climatic signal of larch light rings from different geographical regions of the Siberian Subarctic have been shown. Temperatures of the end of the growth period (August) have the main influence on light ring formation in Western Siberia, and of the beginning of the growth period (June)—in Eastern Siberia. Differences between temperature responses of light ring chronologies due to June temperature increasing correspond to the increase in continental climate from west to east in Siberia. Revealed clusters of light ring chronologies have similar signal and divide the Siberian Subarctic into five large areas. These five areas are consistent with the areas of tree-ring chronologies.

Keywords: northern forest-tundra, Siberia, larch, light rings, continentality, temperature

REFERENCES

1. Abaimov A.P., Bondarev A.I., Zyryanova O.A., Shitova S.A. *Lesa Krasnoyarskogo Zapolyar'ya* [Forest of Krasnojarsk's Polar Region]. Novosibirsk: Nauka Publ., 1997. 208 p.
2. Agafonov L.I., Gurskaya M.A. Influence of longitudinal gradient to adial growth of main forest tree species in North-Western Siberia. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2012, no. 5, pp. 48–60. (In Russ.).
3. Antonova G.F. *Rost kletok khvoinykh* [Growth of Coniferous Cells]. Novosibirsk: Nauka Publ., 1999. 232 p.
4. Vaganov E.A., Shiyatov S.G., Mazepa V.S. *Dendroklimaticheskie issledovaniya v Uralo-Sibirskoi Subarktike* [Dendrochronological Studies in Ural-Siberian Subarctic]. Novosibirsk: SO RAN Publ., 1996. 246 p.
5. Bulygina O.N., Razuvaev V.N., Trofimenko L.T., Shvets N.V. Description of Mean Temperature Data on Russian Weather Stations. Database State Registration Certificate no. 2014621485. Available at: http://meteo.ru/data/156-temperature#opisanie-massiva-dannyh (accessed: 09.11.2020). (In Russ.).
6. Golubchikov Yu.N. *Geografiya gornykh i polyarnykh stran* [Geography of Mountain and Polar Countries]. Moscow: Mosk. Gos. Univ. Publ., 1996. 304 p.
7. Gurskaya M.A., Agafonov L.I. Reconstruction of short growth periods on the north of Western Siberia based on light rings of coniferous trees. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2013, no. 1, pp. 42–53. (In Russ.).
8. Gurskaya M.A., Ben'kova V.E. Types of light rings in Larix sibirica Ledeb. and L. Gmelinii (Rupr.) Rupr. at upper tree-line in Ural-Siberian Subarktic. *Botan. Zh.*, 2013, vol. 98, no. 8, pp. 103–120. (In Russ.).
9. Dylis N.V. *Listvennitsa. Bibliotechka "Drevesnye porody"* [Larch. "Tree Species" Library]. Moscow: Lesnaya prom. Publ., 1981. 96 p.
10. Pozdnyakov L.K. *Daurskaya listvennitsa* [Gmelin Larch]. Moscow: Nauka Publ., 1975. 153 p.
11. Tihomirov V.N., Koropachinskii I.Yu., Falaleev Ye.N. *Listvennichnye lesa Sibiri i Dal'nego Vostoka* [Larch Forests in Siberia and Far East]. Moscow–Leningrad: Goslesbumizdat Publ., 1961. 164 p.

12. Chytry M., Danihelka J., Kubešova S., Lustyk P.,Ermakov N., Hajek M., Hajkova P., Koči M., Otypkova Z., Roleček J., Řezničkova M., Šmarda P., Valachovič M., Popov D., Pišut I. Diversity of forest vegetation across a strong gradient of climatic continentality: Western Sayan Mountains, southern Siberia. *Plant Ecol.*, 2008, vol. 196, pp. 61–83.
13. Driscoll D.M., Fong J.M.Y. Continentality: A basic climatic parameter re-examined. *Int. J. Climatol.*, 1992, no. 12, pp. 185–192.
14. Filion L., Payette, S., Gauthier L., Boutin Y. Light rings in sub-arctic conifers as a dendrochronological tool. *Quat. Res.*, 1986, no. 26, pp. 272–279.
15. 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, no. 36, pp. 5–11.
16. 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. *Rus. J. Ecol.*, 2019, no. 50(4), pp. 343–351.
17. Gurskaya M. A., Hallinger M., Eckstein D., Wilmking M. Extreme cold summers in Western Siberia derived from light rings of conifers. *Phyton*, 2012, no. 52 (1), pp. 101–119.
18. Holmes R.L. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bull.*, 1983, vol. 43, pp. 69–78.
19. *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation*. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Field C.B., Barros V., Stocker T.F., et al., Eds. Cambridge Univ. Press, 2012. 582 p.
20. Kaennel M., Schweingruber F.H. *Multilingual Glossary of Dendrochronology. Terms and Definitions in English, German, French, Spanish, Italian, Portuguese, and Russian*. Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research, Ed. Bern: Haupt, 1996. 467 p.
21. Linderholm H.W., Solberg B.O., Lindholm M. Tree-ring records from central Fennoscandia: the relationship between tree growth and climate along a west–east transect. *The Holocene*, 2003, no 13(6), pp. 887–895.
22. Miyamoto Y., Griesbauer H.P., Green D.S. Growth responses of three coexisting conifer species to climate across wide geographic and climate ranges in Yukon and British Columbia. *For. Ecol. Manage*, 2010, no. 259, pp. 514–523.
23. Rinn F. *TSAP Time Series Analysis and Presentation. Version 3.0. Reference Manual*. Heidelberg, Germany: Frank Rinn Distribution, 1996. 262 p.
24. Rossi S., Deslauriers A., Gricar J. et al. Critical temperatures for xylogenesis in conifers of cold climates. *Glob. Ecol. Biogeogr.*, 2008, vol. 17, no. 6, pp. 696–707.
25. Szeicz J.M. White spruce light rings in northwestern Canada. *Arct. Alp. Res.*, 1996, pp. 184–189.
26. Vaganov E.A., Hughes M.K., Shashkin A.V. *Growth Dynamics of Conifer Tree Rings: Images of Past and Future Environments*. Ecological Studies, vol. 183. Springer, 2006. 356 p.
27. Van Der Veken S., Bossuyt B., Hermy M. Climate gradients explain changes in plant community composition of the forest understory: an extrapolation after climate warming. Belg. J. Bot., 2004, vol. 137, no. 1, pp. 55–69.
28. Wang L., Payette S., Bégin Y. A quantitative definition of light rings in black spruce (Picea mariana) at the arctic treeline in northern Quebec, Canada. *Arct. Antarct. Alp. Res.*, 2000, vol. 32, no. 3, pp. 324–330.
29. Yamaguchi D.K., Filion L., Savage M. Relationship of temperature and light ring formation at subarctic treeline and implications for climate reconstruction. *Quat. Res*. 1993, no. 3, pp. 256–262.