

DOI 10.17516/1997-1389-0381

УДК 551.513: 581.824.1

## **Influence of Atmospheric Circulation on the Formation of Light Rings in Larches in the Subarctic Siberia**

**Marina A. Gurskaya\***

*Institute of Plant and Animal Ecology UB RAS  
Ekaterinburg, Russian Federation*

Received 03.03.2022, received in revised form 20.05.2022, accepted 20.06.2022

---

**Abstract.** Atmospheric circulation determines both weather and climatic conditions of a region. Phase changes in extratropical circulation lead to long-term climatic changes in high latitudes due to the alterations in atmospheric pressure and redistribution of precipitations. In high latitudes biota is especially sensitive to climatic fluctuations. One of the climatic characteristics of high latitudes is the recurrence of extreme climatic events such as short/cold growing season, which can be registered in annual tree rings as light rings (rings with underdeveloped late wood zone). We compared the frequency of formation of light rings in Subarctic Siberia, their intensity and spatial distribution with the main types of atmospheric circulation characteristic of high latitudes: North Atlantic Oscillation, Arctic Oscillation and Pacific Decadal Oscillation. Chronologies of light rings were built based on the data from 19 sites located in the northern forest tundra from the Polar Urals to the Kolyma River which make a 4000-km-long profile. We focused on the periods when light rings are formed frequently during a decade (more than four years with light rings per decade) and, on the contrary, very rarely (less than three cases per decade). Positive correlations of light-ring chronologies with the North Atlantic Oscillation index in September of the preceding year were revealed in the Siberian and Gmelinii larches. Negative correlations were revealed with the July Arctic Oscillation index and June Pacific Oscillation index in the Gmelinii and Kajanderii larches. Massive formation of light rings resulting from registered volcanic eruptions does not coincide with the phases of atmospheric oscillations. In the long-term periods (several decades), light rings can be markers of positive or negative phases of different types of atmospheric circulation.

**Keywords:** North Atlantic Oscillation, Arctic Oscillation, Pacific Decadal Oscillation, light rings, larch, Subarctic Siberia.

---

© Siberian Federal University. All rights reserved

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0).

\* Corresponding author E-mail address: marina\_gurskaya@mail.ru  
ORCID: 0000-0001-5815-7228

**Acknowledgements.** This work was supported in part by RFBR (No. 20-05-00569a) and Russian Science Foundation (No. 21-14-00330) grants, with partial support from State Program No. FUWU-2022-0004.

---

Citation: Gurskaya M. A. Influence of atmospheric circulation on the formation of light rings in larches in the Subarctic Siberia. J. Sib. Fed. Univ. Biol., 2022, 15(2), 167–182. DOI: 10.17516/1997-1389-0381

---

## **Влияние атмосферной циркуляции на формирование светлых колец в древесине лиственницы в Сибирской Субарктике**

**М. А. Гурская**

*Институт экологии растений и животных УрО РАН  
Российская Федерация, Екатеринбург*

---

**Аннотация.** Атмосферная циркуляция определяет как погодные, так и климатические условия региона. Изменение атмосферных потоков ведет к формированию аномалий погоды, а изменение фазы внетропических циркуляций – к долгосрочным климатическим изменениям и аномалиям в высоких широтах за счет изменения давления атмосферы и перераспределения осадков. В высоких широтах биота особенно чувствительна к климатическим колебаниям. Одна из климатических характеристик высоких широт – повторяемость экстремальных климатических явлений, таких как короткий/холодный вегетационный период, который может быть зарегистрирован в годичных кольцах деревьев в виде светлых колец (колец с не полностью сформированной зоной поздней древесины). В работе проведено сравнение частоты формирования светлых колец в Сибирской Субарктике, их интенсивности формирования и пространственного распределения с основными типами атмосферной циркуляции, характерными для высоких широт: Северо-Атлантическим колебанием, арктической осцилляцией и тихоокеанской декадной осцилляцией. Хронологии светлых колец построены на основе 19 точек, расположенных в северной лесотундре от Полярного Урала до р. Колыма, составляя профиль длиной 4000 км. Выделены периоды, когда светлые кольца формируются часто в течение десятилетия (более четырех лет в десятилетие) или, наоборот, очень редко (менее трех случаев в десятилетие). Выявлены значимые ( $p\text{-level} \leq 0,05$ ) положительные корреляционные связи с Северо-Атлантическим колебанием в сентябре предшествующего года у лиственницы сибирской и Гмелина; отрицательные корреляции с арктической осцилляцией июля и с тихоокеанской осцилляцией июня у лиственницы Гмелина и Каяндера. Крупные извержения вулканов проявляются в виде массового формирования светлых колец в отдельно взятый год на большой территории и не влияют на частоту формирования светлых колец в результате воздействия разных фаз атмосферной осцилляции. В долгосрочной перспективе (несколько десятилетий) светлые кольца могут быть маркерами положительных или отрицательных фаз атмосферной циркуляции разных типов.

**Ключевые слова:** Северо-Атлантическое колебание, арктическая осцилляция, тихоокеанская декадная осцилляция, светлые кольца, лиственница, Сибирская Субарктика.

**Благодарности:** Работа выполнена при частичной поддержке грантов РФФИ (№ 20-05-00569а) и РФФ (№ 21-14-00330), частичной поддержке государственной программы № FUWU-2022-0004.

Цитирование: Гурская, М. А. Влияние атмосферной циркуляции на формирование светлых колец в древесине лиственницы в Сибирской Субарктике // Журн. Сиб. федер. ун-та. Биология, 2022. 15(2). С. 167–182. DOI: 10.17516/1997-1389-0381

## Введение

Климат в определенном месте – это среднее состояние атмосферы за длительный период, например несколько месяцев или лет. Климат меняется намного медленнее, чем погода, которая может сильно меняться день ото дня. Естественную форму изменчивости климата, объясняющую короткие и длинные фазы климата, вызванные естественными крупномасштабными особенностями, описывают климатическими индексами. В частности, индексы аномалий атмосферного давления в разных местах в пределах рассматриваемой области рассчитывают, используя градиент атмосферного давления между точками, а не абсолютные значения станции.

В широтах выше 20° самыми распространенными индексами аномалий атмосферного давления являются Северо-Атлантическое колебание (САК), впервые описанное около ста лет назад Уолкером (Walker, 1923; Barnston, Livezey, 1987), арктическая осцилляция (АО), выделенная относительно недавно (Thompson, Wallace, 1998), тихоокеанская декадная осцилляция (ТДО), отмеченная также около ста лет назад (Walker, Bliss, 1932) и др. Как и любые осцилляции, названные индексы характеризуются положительной и отрицательной фазой (рис. 1).

Северо-Атлантическое колебание формируется в результате разницы давлений между Азорскими островами и Исландией и проявляется сильной циркуляцией ветров в море.

Влияние САК и его фаз ощущается во всем Атлантическом океане и на окружающих его континентах. В положительной фазе САК в Северной Европе (Скандинавии) наблюдается усиление штормов и осадков, а также температуры выше средних, что связано с воздушными массами, прибывающими из более низких широт. В то же время в Южной Европе наблюдается уменьшение штормов и осадков ниже среднего. В восточной части Северной Америки положительная фаза САК приводит к меньшему количеству снегопадов в коридоре Вашингтон, округ Колумбия / Нью-Йорк и более низким температурам на восточном побережье Канады и западе Гренландии. В отрицательной фазе САК атлантическое течение более ориентировано с запада на восток, и это приводит к уменьшению штормов, уровню осадков ниже среднего и температурам ниже средних в Северной Европе. Напротив, в Южной Европе наблюдается усиление штормов, количество осадков выше среднего и температура выше средней. В восточной части Северной Америки отрицательная фаза САК обычно приводит к более низкому атмосферному давлению, что вызывает зимние шторма и холод (рис. 1).

Арктическое колебание характеризуется различным давлением воздуха в высоких широтах Арктики по сравнению с более низкими северными широтами. Ключевой особенностью АО является его зонально-симметричный вид с основным центром действия над Арктикой

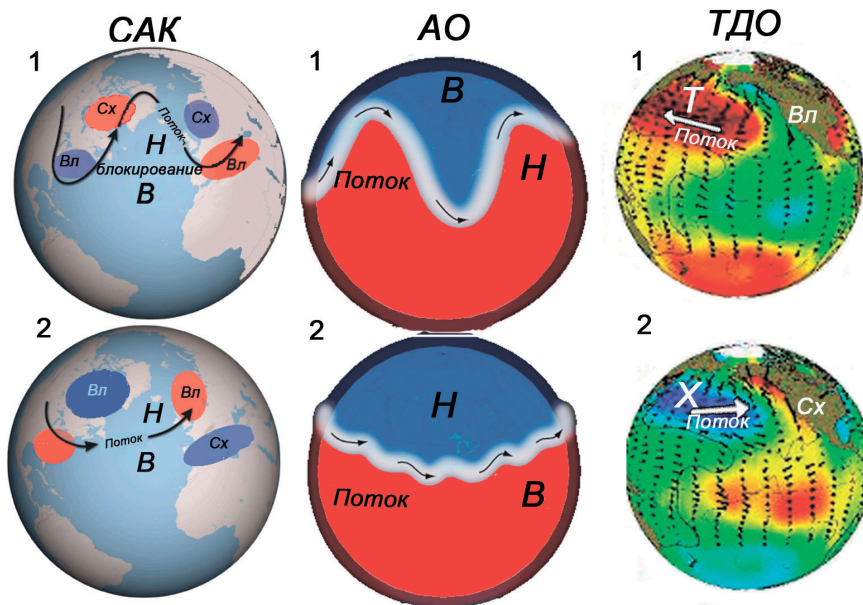


Рис. 1. Основные типы атмосферной осцилляции в высоких широтах северного полушария: 1 – отрицательная фаза, 2 – положительная фаза, Н – низкое давление, В – высокое давление, Сх – мало осадков, Вл – много осадков, Т – теплый воздух, Х – холодный воздух, стрелки указывают направление потоков воздуха, «поток» – воздушный поток, красным выделены теплые области, синим – холодные

Fig. 1. Main types of atmospheric oscillations at high latitudes of the northern hemisphere. САК – NAO, ТДО – PDO. 1 – negative phase, 2 – positive phase. Н – low pressure, В – high pressure, Сх – low precipitation, Вл – high precipitation, Т – warm air mass, Х – cold air mass; arrows show the direction of air flows; “поток” – air flow; warm areas – red, cold areas – blue

и противостоящими аномалиями в средних широтах. В положительной фазе низкое давление над высокой Арктикой притягивает более теплый и влажный воздух на север из более низких широт. В отрицательной фазе давление становится высоким на Крайнем Севере, благодаря чему Арктика остается холодной и сухой, а холодный воздух выталкивается на юг над Северной Америкой и Евразией (рис. 1).

Тихоокеанская декадная осцилляция сосредоточена в средних широтах Тихоокеанского бассейна. Этот климатический режим также влияет на температуру воздуха в прибрежных водах и на поверхности континента от Аляски до Калифорнии. Во время положительной фазы западная часть Тихого океана становится холоднее, а часть восточного океана нагревается; во время отрицательной фазы восточная часть

Тихого океана становится холодной, а количество осадков – выше среднего (рис. 1).

Выявлены достаточно тесные связи между шириной годичного кольца и климатическими осцилляциями. Например, зимние индексы САК могут быть реконструированы на основе ширины годичных колец деревьев, произрастающих в Средиземноморском регионе (D'Arrigo et al., 1993; Cook et al., 1998, 2019; Piovesan, Schirone, 2000). Существуют реконструкции индексов циркуляции весеннего и летнего периодов на основе ширины годичного кольца и изотопного состава колец у деревьев, произрастающих в высоких широтах, что указывает на достаточно тесные связи между САК, АО, ТДО и годичными кольцами (D'Arrigo et al., 2003; Gray et al., 2004; Dinis et al., 2019; Churakova Sidorova et al., 2021).

В высоких широтах биота особенно чувствительна к климатическим колебаниям. Одна из климатических характеристик высоких широт – повторяемость экстремальных климатических явлений, таких как короткий/холодный вегетационный период, который может быть зарегистрирован в годичных кольцах деревьев в виде светлых колец. Светлые кольца – это годичные кольца, характеризующиеся не до конца сформированной зоной поздней древесины: без выраженной зоны поздней древесины, очень узкой зоной поздней древесины или поздняя древесина с тонкостенными незрелыми клетками (Гурская, Бенькова, 2013).

Однако влияние атмосферной циркуляции на частоту и интенсивность формирования светлых колец в Сибирской Субарктике до сих пор не исследовано. Эта работа посвящена выявлению связей между частотой, интенсивностью и пространственным распределением светлых колец и разными типами атмосферной внетропической циркуляции.

### Район исследования, материалы и методы

Район исследования находится в зоне вечной мерзлоты на северном пределе распространения лиственницы от Полярного Урала до реки Колыма, составляя около 4000 км, а точки взятия образцов расположены на расстоянии 250–300 км (рис. 2, таблица).

В общем, для климатических условий региона характерны короткий вегетационный сезон (6–10 недель), невысокая температура самого жаркого месяца июля (около 12–14 °С), небольшое количество осадков (250–350 мм) и низкое испарение, что ведет к заболачиванию понижений рельефа; почвы бедные торфяно-глеевые или торфяно-подзолистые. В Западной Сибири годовая амплитуда температуры составляет около 49 °С, среднегодовое количество осадков не превышает 400 мм, а на севере Восточной Сибири годовая амплитуда температуры достигает в среднем 59 °С, а количество осадков – до 200 мм. Осадки



Рис. 2. Район исследования. Точки – места сбора образцов. Красные линии – границы зон Сибири. Овалы – границы ареалов видов лиственницы

Fig. 2. Study area. Blue dots – sampling sites; red lines – boundaries between Western, Middle and Eastern Siberia; ovals – range of larch populations

Таблица. Характеристики точек сбора. L.s. – *Larix sibirica*, L.g. – *L. gmelinii*, L.c. – *L. cajanderi*Table. Sampling site characteristics. L.s. – *Larix sibirica*, L.g. – *L. gmelinii*, L.c. – *L. cajanderi*

| 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                | 66°57′ | 66°40′  | 100                 | L.s. | 1838          | 163              | 50           |
| 3                | 66°40′ | 66°19′  | 60                  | L.s. | 1832          | 169              | 50           |
| 4                | 68°08′ | 79°46′  | 30                  | L.s. | 1562          | 429              | 18           |
| 5                | 68°07′ | 85°03′  | 50                  | L.s. | 1553          | 438              | 20           |
| Средняя Сибирь   |        |         |                     |      |               |                  |              |
| 6                | 69°23′ | 86°13′  | 20                  | L.s. | 1925          | 85               | 21           |
| 7                | 70°31′ | 89°30′  | 70                  | L.s. | 1615          | 376              | 20           |
| 8                | 71°20′ | 93°50′  | 70                  | L.g. | 1540          | 451              | 24           |
| 9                | 72°27′ | 101°45′ | 20                  | L.g. | 1644          | 347              | 20           |
| 10               | 71°54′ | 111°02′ | 25                  | L.g. | 1570          | 421              | 20           |
| 11               | 71°42′ | 118°35′ | 80                  | L.g. | 1600          | 391              | 23           |
| 12               | 71°06′ | 127°17′ | 70                  | L.g. | 1425          | 567              | 22           |
| Восточная Сибирь |        |         |                     |      |               |                  |              |
| 13               | 70°57′ | 132°59′ | 20                  | L.c. | 1518          | 474              | 21           |
| 14               | 70°15′ | 138°10′ | 80                  | L.c. | 1301          | 691              | 22           |
| 15               | 70°30′ | 148°08′ | 20                  | L.c. | 1425          | 670              | 21           |
| 16               | 69°28′ | 152°06′ | 30                  | L.c. | 1414          | 581              | 26           |
| 17               | 69°17′ | 154°46′ | 50                  | L.c. | 1412          | 580              | 22           |
| 18               | 67°12′ | 165°06′ | 470                 | L.c. | 1568          | 424              | 20           |
| 19               | 67°28′ | 167°40′ | 450                 | L.c. | 1420          | 572              | 20           |

выпадают в основном в летний период. Высота снежного покрова в среднем составляет не более 30 см, достигая высоты до 90 см на отдельных местообитаниях в Западной Сибири и не превышая 30 см в Восточной. Лиственница формирует здесь редины и редколесья с нормальным режимом увлажнения за счет воды, поступающей как с осадками, так и за счет сезонного оттаивания многолетнемерзлотных пород (Природные условия, 1963, 1964, 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).

Сбор образцов древесины проведен на модельных деревьях без внешних повреждений, здоровых, прямоствольных, отдельно стоящих, произрастающих в свежих местообитаниях (с нормальным режимом увлажнения почвы), ровных или с небольшим уклоном (до 5°). На каждой точке собрано по 20–50 кернов на высоте ствола 1,3 м. Образцы были

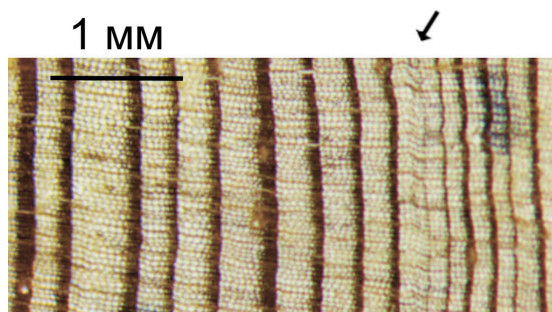


Рис. 3. Светлое кольцо (зона поздней древесины указана стрелкой) у лиственницы. Увеличение 20х  
 Fig. 3. Light rings in larch; latewood is indicated by an arrow. Magnification x20

перекрестно датированы на основе хронологий по ширине годовых колец с использованием программ TSAP (Rinn, 2003) и COFECHA (Holmes, 1994). Светлые кольца выявляли визуально под микроскопом на основе разницы в окраске между прилежащими кольцами (рис. 3).

Для каждой точки сбора материала был определен процент светлых колец от общего числа колец в отдельный год и построены точные хронологии светлых колец. Для каждой точки в каждой точечной хронологии исключили случаи, где количество светлых колец было менее 10 % (один случай на десять и более колец), так как такие кольца могли быть неклиматической природы (Gurskaya, 2019). Затем точечные хронологии были объединены простым арифметическим осреднением в обобщенные хронологии по светлым кольцам для каждого вида лиственницы (рис. 4). Второй использованный подход – построение хронологий на основе пространственного распределения светлых колец. Для каждого вида лиственницы была определена доля местообитаний от общего числа точек, на которых проявился сигнал в виде светлых колец (рис. 5).

Длина имеющихся рядов данных, построенных на основании прямых расчетов разницы в давлении между точками, раз-

лична в настоящее время. Поэтому данные по атмосферной циркуляции были взяты на интернет-ресурсе Королевского метеорологического института Нидерландов <http://climexp.knmi.nl>. В работе был использован общий период с 1900 по 2010 г. как по хронологиям светлых колец, так и по типам атмосферных осцилляций.

Коэффициенты корреляции Пирсона рассчитаны в программе Statistica 8.0 для периода с сентября предшествующего года, по август текущего.

## Результаты

### *Хронологии светлых колец*

В хронологиях, основанных как на количестве светлых колец, так и на их пространственном распределении, можно отметить периоды, когда светлые кольца образуются массово или на большой территории. В то же время есть периоды, когда светлых колец мало или они редко встречаются (рис. 4). У лиственницы сибирской, произрастающей в Западной Сибири, периоды массового формирования светлых колец приурочены в 1900–1930 и с 1990 по 2000 г., в эти периоды формируется около шести светлых колец в десятилетие. В период 1930–1970 гг. светлые кольца у лиственницы сибирской формируются значительно реже, в среднем по три

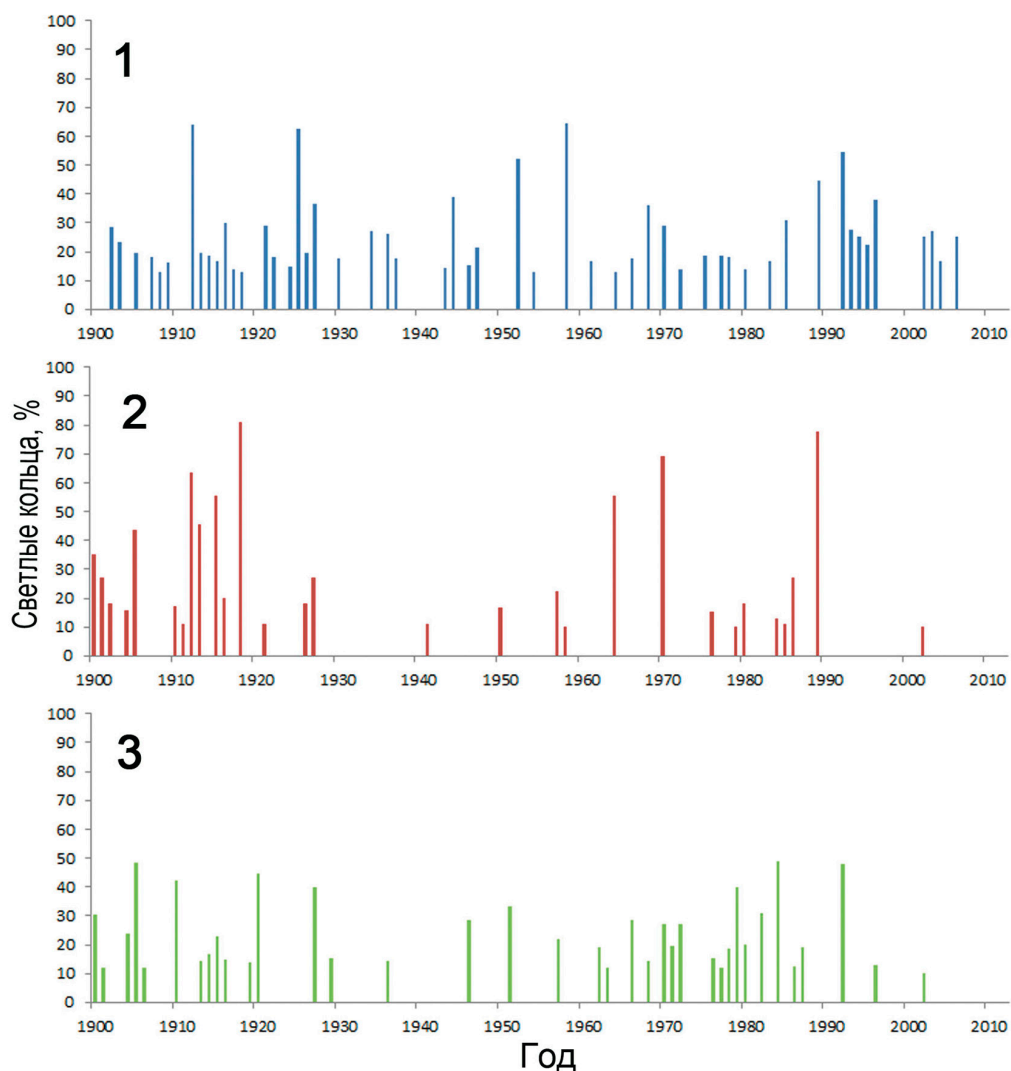


Рис. 4. Хронологии светлых колец (частота встречаемости в % от общего числа проанализированных ядер) трех видов лиственницы: 1 – *Larix sibirica*, 2 – *L. gmelinii*, 3 – *L. cajanderi*

Fig. 4. Chronologies of light rings (% of the number of tree rings for each year) of three larch species: 1 – *Larix sibirica*, 2 – *L. gmelinii*, 3 – *L. cajanderi*

кольца в десятилетие. В остальные периоды отмечено по 3–4 светлых кольца в десятилетие. У лиственницы Гмелина светлые кольца встречаются часто в периоды 1900–1930 и 1980–1990 гг. (чаще четырех раз в десятилетие), а в периоды с 1930 по 1950 и с 1960 по 1970 гг. светлые кольца формируются не чаще одного раза в десятилетие. На севере Восточной Сибири также выделяются периоды 1900–1920 и 1970–1990 гг., когда светлые

кольца формируются часто у лиственницы Каяндера.

При анализе пространственного распределения светлых колец у лиственницы сибирской можно выделить периоды, когда светлые кольца выявляются массово на большинстве местообитаний (более, чем на двух), это 1900–1910, 1920–1930, 1970–1980, 1990–2000 гг., у лиственницы Гмелина эти периоды менее выражены, но тоже могут быть от-



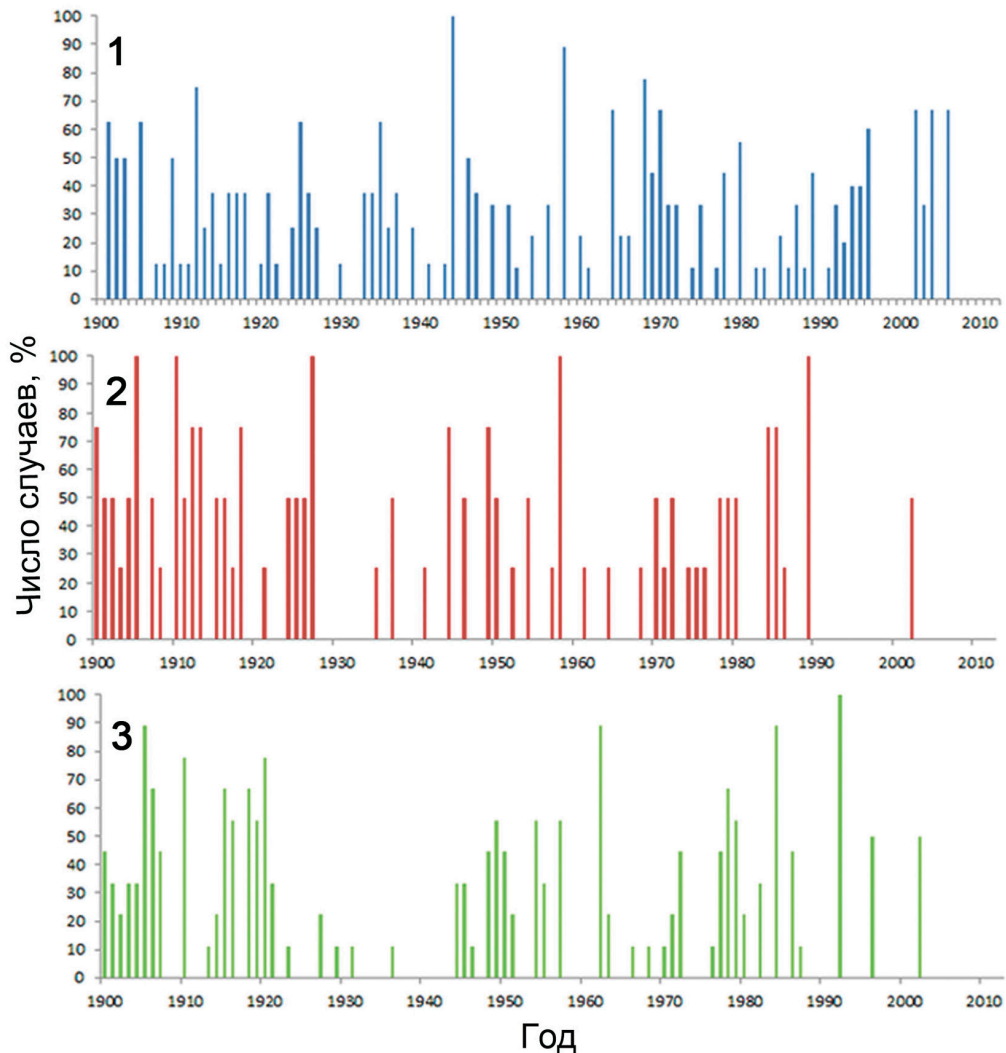


Рис. 5. Хронологии светлых колец (доля мест сбора образцов, на которых выявлены светлые кольца, в процентах от их общего числа) трех видов лиственницы: 1 – *Larix sibirica*, 2 – *L. gmelinii*, 3 – *L. cajanderi*  
 Fig. 5. Chronology of larch light rings (% of sampling sites where light rings were found): 1 – *Larix sibirica*, 2 – *L. gmelinii*, 3 – *L. cajanderi*

мечены в 1900–1910, 1920–1930, 1950–1960, 1970–1990 гг., у лиственницы Каяндера это 1900–1920, 1945–1955, 1970–1990 гг. Таким образом, в течение XX столетия существуют периоды, когда у лиственницы, произрастающей на северном пределе распространения, массово формируются светлые кольца. Некоторые из этих периодов характерны для всех видов лиственницы в любой зоне Сибири, например начало XX в.– 1900–1930 гг. и ко-

нец XX в.– 1970–2000 гг. В то же время есть периоды, когда светлые кольца формируются редко.

Во всех хронологиях выделяются годы с аномально массовым формированием светлых колец (более 40 % от общего числа колец). В Западной Сибири это 1912, 1925, 1958 и 1992 гг., в Средней – 1912, 1918, 1952, 1964, 1970 и 1989 гг., в Восточной – 1905, 1910, 1920, 1970 и 1984 гг.

Связи хронологий светлых колец  
с типами осцилляций

Исходя из того, что существуют периоды, когда светлые кольца массово и часто отмечаются, логично предположить, что на их формирование влияют долговременные изменения в природно-климатических условиях. Коэффициенты корреляции между хронологиями массового формирования светлых колец и различными типами осцилляций показали значимые положительные связи с индексом САК сентября предшествующего года у лиственницы сибирской и Гмелина и октября предшествующего года у лиственницы Каяндера (рис. 6. a1, b1).

Отрицательные корреляционные связи хронологий светлых колец лиственницы Гмелина выявлены с индексом АО августа, а для хронологии лиственницы Каяндера из Вос-

точной Сибири отрицательные связи отмечены с индексом ТДО (рис. 6. a2, a3).

В хронологиях по пространственному распределению светлых колец не выявлены отрицательные связи с САК ни у одного вида лиственницы. Влияние АО проявляется в июле текущего года и в сентябре-октябре предшествующего года у лиственницы Гмелина и Каяндера, и в июне выявлены отрицательные связи с индексами ТДО у этих же видов (рис. 6b). Кроме этого, индексы ТДО сентября предшествующего года имеют отрицательные связи со светлыми кольцами у лиственницы Каяндера.

Отдельные годы с массовым формированием светлых колец обычно следуют в течение одного-двух лет после крупных извержений вулканов с  $VEI \geq 4$ . Например, 1904 г. – Санта-Мария, 1907 г. – Ксудач, 1912 г. – Новаруп-

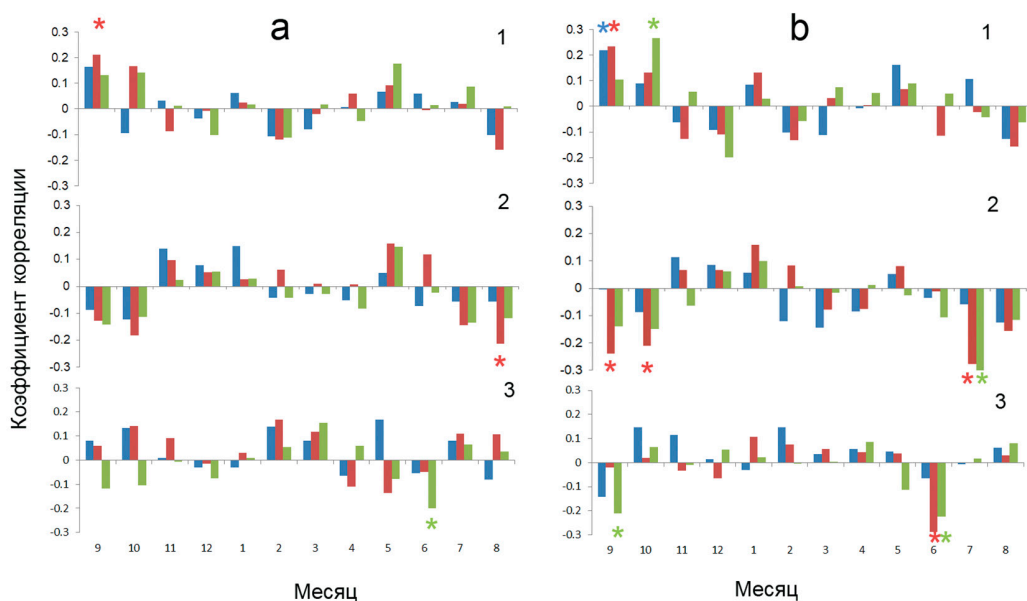


Рис. 6. Корреляции между типами осцилляций (1 – САК, 2 – АО, 3 – ТДО) и хронологиями светлых колец (а – по максимальному количеству колец, б – по пространственному распределению). Синий – лиственница сибирская, красный – лиственница Гмелина, зеленый – лиственница Каяндера. Звездочкой отмечены значимые корреляции  $p\text{-level} \leq 0,05$

Fig. 6. Correlations between the types of atmospheric oscillations (1 – NAO, 2 – AO, 3 – TDO) and chronologies of light rings (a – mass light ring formation, b – spatial distribution). Blue – *Larix sibirica*, Red – *L. Gmelinii*, Green – *L. Kajanderii*. Asterisks indicate significant correlations  $p\text{-level} \leq 0,05$

та, 1916 г. – Серро-Азул, 1924 г. – Райкоке, 1966 г. – Келюд и Аву, 1968 г. – Фернандина, 1982 г. – Эль Чичон, 1983 г. – Коло, 1986 г. – Августин и Чикурачки, 1991 г. – Пинатубо и Серро-Хадсон. Однако в эти годы и в годы с массовым формированием светлых колец средние значения индексов осцилляций стремятся к нейтральным значениям (рис. 7).

### Обсуждение результатов

Достаточно беглого взгляда на хронологии светлых колец, полученные любым способом, чтобы заметить, что частота формирования светлых колец непостоянна в разные временные периоды на протяжении XX в., это явление характерно для всех видов лиственницы, произрастающей на северном перделе

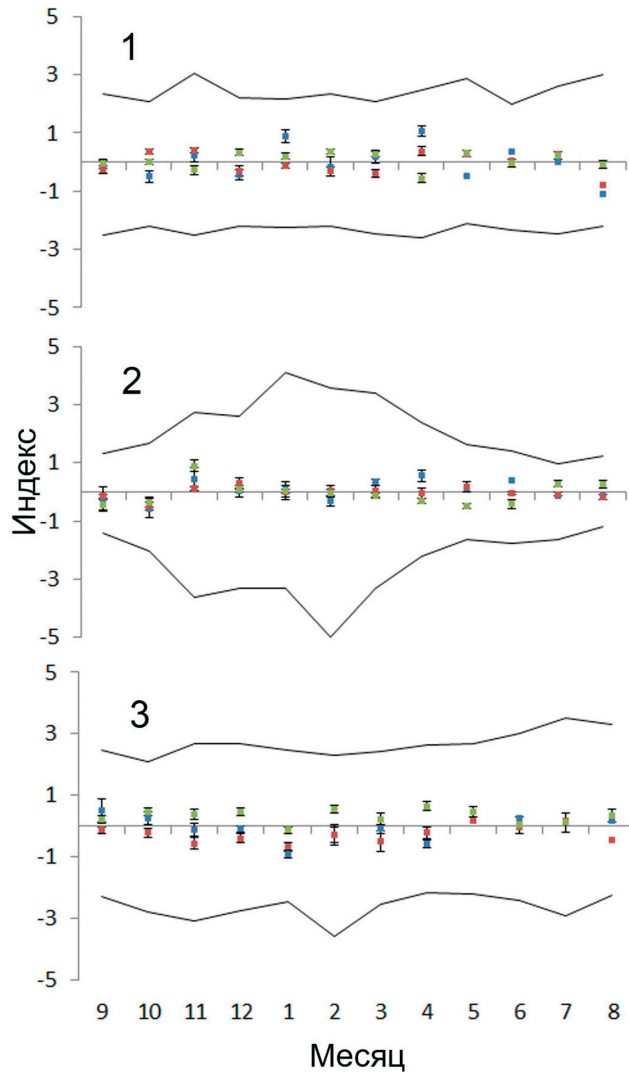


Рис. 7. Максимальные значения индексов разных типов осцилляций (черные линии, 1 – САК, 2 – АО, 3 – ТДО) и средние значения индексов в годы массового формирования светлых колец у лиственниц. Цветовая схема как на рис. 6.

Fig. 7. Maximum values of atmospheric oscillation indices (black lines, 1 – NAO, 2 – AO, 3 – TDO) and averaged indices for the years of mass light rings formation in larches (color scheme as in Fig. 6): 1 – NAO, 2 – AO, 3 – TDO

распространения в Сибири. Длительные периоды как с высокой, так и с низкой частотой формирования светлых колец не могут быть объяснены влиянием каких-либо краткосрочных экстремальных погодных явлений (таких как извержения вулканов, вспышки насекомых вредителей), а связаны, скорее всего, с долгосрочными изменениями климатических условий произрастания. Одним из таких факторов могут быть климатические осцилляции, наблюдаемые в разных частях планеты.

В летние периоды влияние осцилляций на изменчивость климатических условий в высоких широтах снижается, так как перепады температуры между полюсами и тропиками несколько выравниваются. В целом получено, что атмосферные осцилляции в среднем определяют до 30 % изменчивости температуры в высоких широтах, при этом минимальный вклад в динамику температуры вносит САК (Ророва, 2009). Однако, несмотря на это, связи между типами осцилляций и хронологиями светлых колец были отмечены по всей Сибирской Субарктике.

Светлые кольца у лиственницы сибирской, которая произрастает в западной части Сибири, формируются под влиянием положительной фазы САК. Положительные связи между САК предшествующего года и светлыми кольцами могут быть интерпретированы следующим образом: теплые влажные условия осени, которые создает САК в своей положительной фазе в Скандинавии, на европейской территории России и частично в Западной и Средней Сибири могут способствовать увеличению снегонакопления в осенне-зимний период. В результате этого весной разрушение снежного покрова может происходить несколько дольше, что сокращает длительность вегетационного периода и влияет на процессы формирования годич-

ного кольца (Vaganov et al., 1999; Kirilyanov et al., 2003). Кроме этого, не исключено ухудшение процессов перераспределения и запасаания углеводов при подготовке к периоду покоя. Влияние условий осени, в частности температуры, на формирование ширины годичного кольца у разных видов хвойных деревьев показано для некоторых местообитаний в Западной Сибири (Gurskaya et al., 2012). Следовательно, связи между формированием светлых колец и САК осени предшествующего года потенциально могут существовать в Западной Сибири.

Влияние САК на формирование светлых колец у лиственницы Каяндера затруднительно объяснить исходя из имеющихся данных. Возможно, это либо ошибка статистических расчетов, либо проявление планетарного дистанционного влияния между разными типами осцилляций (Rogers, 1984; Kucharski et al., 2006; Song et al., 2009; Sun et al., 2015).

Формирование светлых колец у лиственницы, произрастающей в Средней Сибири, увеличивается, когда АО находится в своей отрицательной фазе. На лиственницу Гмелина АО оказывает наиболее сильное влияние. В Средней Сибири, где произрастет лиственница Гмелина, влияние САК и ТДО существенно уменьшается, а АО остается основным типом осцилляции, которое может влиять на формирование структуры годичных колец. Влияние АО августа на формирование светлых колец у лиственницы Гмелина подтверждает, что светлые кольца массово образуются в результате арктического вторжения воздуха в отрицательную фазу АО. При этом арктическое вторжение может быть как осенью предыдущего года и влияет на переход деревьев в период покоя, так и в летнее время, в период, когда наблюдается активное формирование поздней древесины. Холодный воздух в период преобладания отрицательной

фазы затекает с высоких широт Арктики, сокращает вегетационный период на несколько дней или даже недель.

Различия в корреляционных связях (в знаке связи и значимых месяцах) между хронологиями светлых колец и САК и АО подтверждают, что, несмотря на возможную дистанционную взаимосвязь между этими типами осцилляций (Hu, Guan, 2018), они оказывают различное воздействие на формирование структуры годичных колец у лиственницы, произрастающей в Западной и Средней Сибири. Это скорее всего обусловлено различиями в распределении приповерхностной температуры и влажности воздуха в зависимости от типа циркуляции.

ТДО в основном влияет на частоту формирования светлых колец лиственницы Каяндера, произрастающей на севере Восточной Сибири. В положительной фазе ТДО светлых колец формируется меньше, чем в отрицательной, а основным месяцем, влияющим на формирование светлого кольца, является июнь. В этот период годичные кольца и зона поздней древесины у лиственницы Каяндера чувствительны к условиям внешней среды, в частности к температуре воздуха (Ваганов и др., 1996; Gurskaya, 2019). В отрицательную фазу ТДО наблюдается перенос теплого и сухого воздуха с Тихого океана на материк. Однако именно эти условия создают более холодные условия и выраженный дефицит влажности в высоких широтах Восточной Сибири, которые в июне могут влиять на формирование материнских клеток ксилемы поздней древесины.

Кроме влияния отрицательной фазы АО и ТДО на формирование светлых колец, которое может длиться несколько десятилетий, имеет значение и краткосрочное изменение термического режима вследствие извержения вулканов (Gurskaya, 2017, 2019). Извержения

вулканов ведут к усилению частоты встречаемости светлых колец в древесине лиственницы в отдельно взятые годы (например, 1912, 1970, 1984, 1992) как на большой территории, так и на отдельно взятых местообитаниях. В годы массового формирования светлых колец значения индексов осцилляций не оказывают существенного влияния на структуру годичного кольца, так как значения индексов стремятся к нулю. Более того, подобные годы отмечены в периоды, когда осцилляции меняют знак своей фазы на противоположный. Разница в давлении между тропическими и внетропическими широтами в такие переходные периоды минимальная, следовательно, любые типы осцилляций оказывают наименьшее влияние на климатические условия. Таким образом, извержения вулканов или иные экстремальные краткосрочные природные события оказывают существенное влияние на массовое формирование светлых колец за счет снижения средних планетарных значений температуры воздуха (до 1,5 °C (Sigl et al., 2015)), а воздействие атмосферных осцилляций исключается или существенно уменьшается. Атмосферные осцилляции оказывают влияние в долгосрочной перспективе, изменяя частоту формирования светлых колец в течение десятилетий, но при этом не влияют на их массовое формирование.

### **Заключение**

В высоких широтах Сибири светлые кольца формируются с определенной периодичностью. В хронологиях светлых колец, построенных как по признаку массового формирования в течение одного года, так и по признаку массового пространственного распределения, выделяются периоды как с высокой частотой формирования светлых колец, так и с редкими случаями на протяжении десятилетия. Изменения в частоте

формирования светлых колец приурочены к изменению климатических периодов. В частности, выявлены связи хронологий светлых колец с различными типами атмосферных осцилляций. Формирование светлых колец у лиственницы сибирской зависит от индекса Северо-Атлантической осцилляции сентября предшествующего года, возможно, за счет увеличения толщины и медленного разрушения снежного покрова. У лиственницы Гмелина светлые кольца формируются под влиянием вторжения холодных воздушных масс в июле, в те периоды, когда арктическая осцилляция находится в своей отрицательной фазе. Светлые кольца лиственницы Каяндера формируются в годы с отрицательной фазой тихоокеанской десятилетней осцилляции. Вероятно, это связано

с блокирующими процессами и вытеснением холодных воздушных масс в высокие широты.

Таким образом, существуют климатические периоды, обусловленные динамикой разницы атмосферного давления между регионами, когда происходит перераспределение температуры, осадков и облачности, что ведет к более частому или более редкому формированию светлых колец у лиственницы, произрастающей в Сибирской лесотундре.

Вулканические извержения и другие краткосрочные природные экстремальные явления увеличивают массовость формирования светлых колец в отдельно взятый год и на большой территории, но в эти годы атмосферная циркуляция не оказывает существенного влияния.

#### Список литературы / References

Абаимов А. П. (1997) *Лиственничные леса и редколесья Севера Сибири: Разнообразие, особенности экологии и лесообразовательного процесса*. Автореф. дисс. ... доктора биол. наук. Новосибирск [Abaimov A. P. (1997) *Larch forests and woodlands in the north of Siberia: Biodiversity, ecological features and forest formation*. Abstract of thesis. diss. for the degree of Doctor of Biol. sciences. Novosibirsk (in Russian)]

Ваганов Е. А., Шиятов С. Г., Мазепа В. С. (1996) *Дендроклиматические исследования в Урало-Сибирской субарктике*. Новосибирск, Наука, Сибирская издательская фирма РАН, 246 с. [Vaganov E. A., Shiyatov S. G., Mazepa V. S. (1996) *Dendroclimatic study in Ural-Siberian subarctic*. Novosibirsk, Nauka, Siberian publishing firm RAS, 246 p. (in Russian)]

Гурская М. А., Бенькова В. Е. (2013) Типы светлых колец у *Larix sibirica* и *L. gmelinii* на верхней границе леса в Урало-Сибирской Субарктике. *Ботанический журнал*, 98(8): 1037–1054 [Gurskaya M. A., Benkova V. E. (2013) Types of light rings in wood of *Larix sibirica* and *L. Gmelinii* at upper tree-line in the Ural-Siberian subarctic. *Botanical Journal* [Botanicheskii Zhurnal], 98(8): 1037–1054 (in Russian)]

*Природные условия и естественные ресурсы СССР. Западная Сибирь* (1963) М., Издательство АН СССР, 488 с. [*Natural conditions and natural resources of the USSR. Western Siberia* (1963) Moscow, Academy of Sciences of the USSR, 488 p. (in Russian)]

*Природные условия и естественные ресурсы СССР. Средняя Сибирь* (1964) М., Издательство АН СССР, 492 с. [*Natural conditions and natural resources of the USSR. Middle Siberia* (1964) Moscow, Academy of Sciences of the USSR, 492 p. (in Russian)]

*Природные условия и естественные ресурсы СССР. Якутия. Том 4* (1965) М., Издательство АН СССР, 464 с. [*Natural conditions and natural resources of the USSR. Yakutia. Volume 4* (1965) Moscow, Academy of Sciences of the USSR, 464 p. (in Russian)]

- Barnston A. G., Livezey R. E. (1987) Classification, seasonality and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns. *Monthly Weather Review*, 115(6): 1083–1126
- Churakova Sidorova O. V., Siegwolf R. T.W., Fonti M. V., Vaganov E. A., Saurer M. (2021) Spring arctic oscillation as a trigger of summer drought in Siberian subarctic over the past 1494 years. *Scientific Reports*, 11(1): 19010
- Cook E. R., D'Arrigo R.D., Briffa K. R. (1998) A reconstruction of the North Atlantic Oscillation using tree-ring chronologies from North America and Europe. *Holocene*, 8(1): 9–17
- Cook E. R., Kushnir Y., Smerdon J. E., Williams A. P., Anchukaitis K. J., Wahl E. R. (2019) A Euro-Mediterranean tree-ring reconstruction of the winter NAO index since 910 C.E. *Climate Dynamics*, 53(3–4): 1567–1580
- D'Arrigo R.D., Cook E. R., Jacoby G. C., Briffa K. R. (1993) NAO and sea surface temperature signatures in tree-ring records from the North Atlantic sector. *Quaternary Science Reviews*, 12(6): 431–440
- D'Arrigo R.D., Cook E. R., Mann M.E., Jacoby G. C. (2003) Tree-ring reconstructions of temperature and sea-level pressure variability associated with the warm-season Arctic Oscillation since AD 1650. *Geophysical Research Letters*, 30(11): 1549
- Dinis L., Bégin C., Savard M.M., Marion J., Brigode P., Alvarez C. (2019) Tree-ring stable isotopes for regional discharge reconstruction in eastern Labrador and teleconnection with the Arctic Oscillation. *Climate Dynamics*, 53(5–6): 3625–3640
- Gray S. T., Graumlich L. J., Betancourt J. L., Pederson G. T. (2004) A tree-ring based reconstruction of the Atlantic Multidecadal Oscillation since 1567 AD. *Geophysical Research Letters*, 31(12): L12205
- Gurskaya M. A. (2017) Use of larch light rings for an evaluation of volcanic explosivity index. *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*, 53(8): 769–780
- Gurskaya M. A. (2019) Effect of summer monthly temperatures on light tree ring formation in three larch species (*Larix*) in the northern forest–tundra of Siberia. *Russian Journal of Ecology*, 50(4): 343–351
- Gurskaya M., Hallinger M., Singh J., Agafonov L., Wilmking M. (2012) Temperature reconstruction in the Ob River valley based on ring widths of three coniferous tree species. *Dendrochronologia*, 30(4): 302–309
- Holmes R. L. (1994) *Dendrochronology program library. Users Manual*. University of Arizona, Tucson
- Hu D., Guan Z. (2018) Decadal relationship between the stratospheric Arctic vortex and Pacific decadal oscillation. *Journal of Climate*, 31(9): 3371–3386
- Kirdyanov A., Hughes M., Vaganov E., Schweingruber F., Silkin P. (2003) The importance of early summer temperature and date of snow melt for tree growth in the Siberian Subarctic. *Trees*, 17(1): 61–69
- Kucharski F., Molteni F., Bracco A. (2006) Decadal interactions between the western tropical Pacific and the North Atlantic Oscillation. *Climate Dynamics*, 26(1): 79–91
- Piovesan G., Schirone B. (2000) Winter North Atlantic oscillation effects on the tree rings of the Italian beech (*Fagus sylvatica* L.). *International Journal of Biometeorology*, 44(3): 121–127
- Popova V. (2009) Modern temperature changes of near surface air in the North of Eurasia: Regional tendencies and role of atmospheric circulation. *Izvestiya Akademii Nauk, Seriya Geograficheskaya*, 6: 59–69 (in Russian)

Rinn F. (2003) *TSAP-Win: time series analysis and presentation for dendrochronology and related applications. Version 0.55, User reference*. Heidelberg, Germany. Available at: <http://www.rimatech.com>

Rogers J.C. (1984) The association between the North Atlantic Oscillation and the Southern Oscillation in the northern hemisphere. *Monthly Weather Review*, 112(10): 1999–2015

Sigl M., Winstrup M., McConnell J.R., Welten K.C., Plunkett G., Ludlow F., Büntgen 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., Schüpbach S., Steffensen J.P., Vinther B.M., Woodruff T.E. (2015) Timing and climate forcing of volcanic eruptions for the past 2,500 years. *Nature*, 523(7562): 543–549

Song J., Li C., Zhou W., Pan J. (2009) The linkage between the Pacific-North American teleconnection pattern and the North Atlantic Oscillation. *Advances in Atmospheric Sciences*, 26(2): 229–239

Sun C., Li J., Feng J., Xie F. (2015) A decadal-scale teleconnection between the North Atlantic Oscillation and subtropical eastern Australian rainfall. *Journal of Climate*, 28(3): 1074–1092

Thompson D.W.J., Wallace J.M. (1998) The Arctic Oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields. *Geophysical Research Letters*, 25(9): 1297–1300

Vaganov E. A., Hughes M. K., Kirilyanov A. V., Schweingruber F. H., Silkin P. P. (1999) Influence of snowfall and melt timing on tree growth in subarctic Eurasia. *Nature*, 400(6740): 149–151

Walker G. T. (1923) Correlation in seasonal variation of weather. VIII: A preliminary study of world weather. *Memoirs of the India Meteorological Department*, 24: 75–131

Walker G. T., Bliss E. W. (1932) World weather V. *Memoirs of the Royal Meteorological Society*, 4(36): 53–84