

УДК 551.583.4

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ АНАЛИЗ ФОРМИРОВАНИЯ УЗКИХ ГОДИЧНЫХ КОЛЕЦ СОСНЫ ЛЕНТОЧНЫХ БОРОВ СТЕПНОЙ ЗОНЫ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

© 2021 г. Н. В. Рыгалова^а, *, Н. Ф. Харламова^а

^аАлтайский государственный университет, Барнаул, Россия

*e-mail: natalia.ml@mail.ru

Поступила в редакцию 19.12.2019 г.

После доработки 24.08.2020 г.

Принята к публикации 30.10.2020 г.

В данной статье изложены результаты исследования узких годовичных колец сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) ленточных боров (юг Западной Сибири) в степной зоне за период с 1661 по 2019 г. В анализе использованы 19 древесно-кольцевых хронологий, полученных по кернам живых деревьев и исторической древесины старых сельских домов. Узкие кольца у 75% всех хронологий были отмечены в 2012, 2003, 1996, 1991, 1980, 1974, 1963, 1910, 1896, 1888, 1812, 1795, 1786, 1752, 1748, 1695, 1690 и 1688 гг., которые могут быть определены как региональные реперные годы. Отмечается увеличение частоты формирования минимумов радиального прироста во второй половине XX в., а также во второй половине XVIII – начале XIX в., а снижение частоты – в конце XVII – начале XVIII в. В годы формирования узких колец почти в 100% случаев отмечается засуха в весенне-летний период (особенно в мае), также значим дефицит осадков в предшествующий осенне-зимний сезон. Установлено, что максимальная концентрация минимумов прироста сосны приходится на периоды преобладания южных меридиональных циркуляционных эпох.

Ключевые слова: узкие годовичные кольца, сосна обыкновенная, древесно-кольцевая хронология, ленточные боры, историческая древесина, засухи, засушливые территории, циркуляционные эпохи, реперный год

DOI: 10.31857/S2587556621010131

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Одним из перспективных направлений дендрозоологического анализа является изучение хронологий узких годовичных колец деревьев. Под узкими годовичными кольцами понимается выраженное снижение ширины радиального прироста по сравнению с средними значениями за предыдущий период роста. Минимумы радиального прироста – это индикаторы проявления неблагоприятных условий среды: их формирование происходит при лимитирующем воздействии какого-либо фактора (или набора факторов) на рост деревьев. Местоположение древостоя в условиях того или иного переходного зонального биома предопределяет причину образования узких годовичных колец: в переходной зоне “лесостепь–степь” чаще всего это засухи [4, 13, 18, 20, 25, 29, 32, 34, 37–39] и малоснежные морозные зимы [33], в зоне “лес–тундра” – холодные летние сезоны [22]. Таким образом, минимумы радиального прироста деревьев позволяют восстановить в ретроспективе погодичную хронологию неблагоприятных климатических событий и их перио-

дичность, что и является предметом данной статьи. Кроме того, они дают возможность индцировать другие природные (например, массовое нападение насекомых-фитофагов и др. [3]) и антропогенные воздействия на деревья [10], что в целом расширяет тематические рамки изучения хронологий узких годовичных колец деревьев. В тех случаях, когда образование минимального прироста обусловлено климатом, годы, представленные узкими кольцами, являются реперными, отмечаются у большинства древесно-кольцевых хронологий (ДКХ) и лежат в основе их перекрестного датирования. Это позволяет, в свою очередь, определять год и сезон заготовки древесины для строительства деревянных домов и сооружений, построенных на юге Западной Сибири.

В данной статье исследована трехсотлетняя хронология минимумов прироста сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) ленточных боров степной зоны, временные закономерности и причины образования узких годовичных колец, сделана попытка географической интерпретации результатов.

Таблица 1. Характеристика обобщенных (индексированных) степных ДКХ ленточных боров юга Западной Сибири*

Название ДКХ (сокращенное)	Длина ДКХ, лет	Продолжительность ДКХ, годы	Минимальное значение	Стандартное отклонение	<i>k</i> чувст.
Токарево	137	1871–2007	0.612	0.16	0.18
Солоновка	321	1693–2013	0.436	0.15	0.17
Мальшев Лог	197	1809–2005	0.604	0.17	0.19
Полевой Стан	157	1857–2013	0.538	0.17	0.19
Волчиха	334	1685–2018	0.233	0.18	0.20
<i>Вострово</i>	202	1693–1894	0.435	0.15	0.17
Горькое-Перешеечное	108	1900–2007	0.586	0.17	0.17
Гуселетово	112	1896–2007	0.544	0.19	0.21
Бычье	210	1803–2012	0.489	0.17	0.18
<i>Усть-Кормиха</i>	145	1713–1857	0.477	0.17	0.19
<i>Бор-Форпост</i>	254	1702–1955	0.160	0.16	0.19
Михайловское	279	1729–2007	0.363	0.18	0.19
<i>Бастан</i>	188	1708–1895	0.416	0.14	0.16
Малиновое Озеро	280	1733–2007	0.488	0.20	0.20
Угловское	149	1865–2003	0.558	0.19	0.20
Угловское-42	337	1661–1997	0.439	0.16	0.18
Угловское-120	130	1868–1997	0.400	0.21	0.24
Северка	150	1858–2007	0.548	0.18	0.19
Васильчуки	239	1781–2019	0.031	0.24	0.27

* Обычным шрифтом написаны названия хронологий, полученных только по живым деревьям; жирным шрифтом отмечены ДКХ, построенные по живым деревьям и продленные с использованием древесины старых домов; курсивом отмечены ДКХ, построенные только по исторической древесине.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследование основано на анализе узких годовичных колец 19 обобщенных древесно-кольцевых хронологий сосны обыкновенной степной части ленточных боров Алтайского края: половина из них была получена ранее [12, 19], остальные ДКХ продлены с использованием древесины старых деревянных домов или полученных только по исторической древесине (табл. 1, рис. 1). Источником исторической древесины выступали старые дома, построенные из сосны, в селах, расположенных вдоль кромки ленточных боров. Продолжительность обобщенных древесно-кольцевых серий колеблется от 108 до 337 лет. Общий период, охватываемый дендрохронологическими данными, составил 359 лет (1661–2019 гг.).

Ленточные боры распространены в лесостепной и степной зонах обособленно от основного ареала сосны обыкновенной и представляют собой южный предел распространения бореальных лесов. Это и определяет в значительной степени зависимость величины прироста деревьев от климатических условий. Прирост сосны в условиях засушливого (семиаридного) климата детерминирован режимом увлажнения территории (соотношением тепла и влаги), поэтому полученные

здесь хронологии могут быть использованы в пространственном анализе засух. В группу степных ДКХ вошли те точки, которые приурочены к зоне засушливой и сухой степи [1]. Для проверки правильности отнесения той или иной хронологии к обозначенной группе был использован метод кластерного анализа всех хронологий ленточных боров, включая лесостепные (правило объединения: метод Уарда [40], мера расстояний: 1-*r* Пирсона [11]) за период 1900–1997 гг. Его результаты подтвердили достоверность выделения степной группы хронологий на основе физико-географической привязки.

С целью удаления различных шумов из древесно-кольцевых серий деревьев, прежде всего возрастных, а также автокорреляционных, в анализе использовались индексированные хронологии (*residual*). Обобщенные ДКХ получены по стандартной методике сбора материала, подготовки образцов, проведения измерения (*LINTAB/TsapWin*) ширины годовичных колец, обработки (*Cofecha*) и стандартизации (*ARSTAN*) хронологий [24, 27, 30, 36].

Существует несколько методов выделения минимумов прироста в хронологии [39], в данной работе был использован метод Кроппера [28]. Ос-

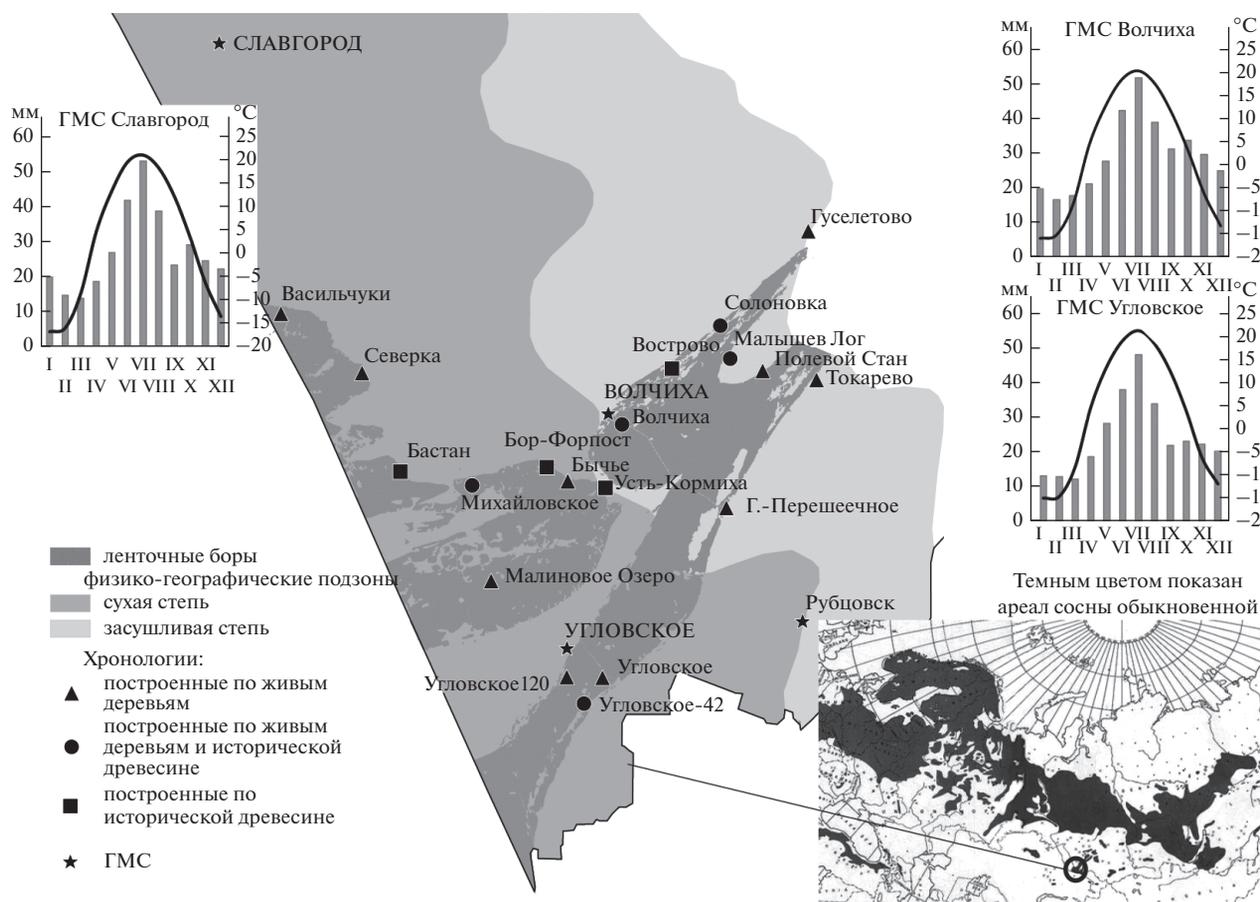


Рис. 1. Территория исследования и пространственная привязка древесно-кольцевых хронологий (границы физико-географических подзон юга Западной Сибири [1]).

новным критерием выделения узкого годичного кольца является уменьшение ширины прироста более, чем на величину среднего квадратического отклонения (0.75 и 1.5σ) от арифметически среднего значения хронологии, которые рассчитывались для скользящего окна (в нашем случае его размер был определен в 7 лет). Использование в расчетах весового коэффициента 0.75 для стандартного отклонения было определено опытным путем при учете методических рекомендаций [28]. Дополнительный расчет порогового значения снижения прироста с использованием весового коэффициента 1.5 для стандартного отклонения позволил выделить anomalно узкие кольца в ДКХ. Минимумы прироста фиксировались, если выделялись у $2/3$ (66.67%) всех хронологий группы.

Определение преобладающих циклов в проявлении узких годичных колец осуществлено с помощью спектрального анализа Фурье [26] в программе *Statistica 13.3*.

Дендроклиматический анализ формирования узких годичных колец выполнен по данным ГМС Волчиха ($52^{\circ}1'3.69''$ и $80^{\circ}19'53.68''$; засушливая

степь), Славгород ($52^{\circ}59'34.82''$ и $78^{\circ}38'19.16''$) и Угловское ($51^{\circ}21'20''$ и $80^{\circ}11'39''$; обе – сухая степь). Для расчета коэффициента корреляции Пирсона были взяты осредненные ДКХ узких годичных колец (региональные реперы) для засушливой степи и сухой степи. В качестве независимых переменных использованы метеорологические данные (температура воздуха, атмосферные осадки и геотермический коэффициент – ГТК по формуле Г.Т. Селянинова) за годы, когда были зафиксированы минимумы годичного прироста (с января по сентябрь), также за годы, предшествующие этому (с мая по декабрь). ГТК был рассчитан в целом для вегетационного периода и за его отдельные месяцы. В связи с временным ограничением метеоданных по территории исследования ряд для анализа включал в себя 12 значений (12 случаев образования минимумов прироста сосны, выделенных согласно обозначенной методике за период инструментальных метеорологических наблюдений в степной зоне Алтайского края).

Была изучена связь узких годичных колец с такими показателями, как “волны тепла” (*HWDI*) [7] и максимальное количество последовательных “су-

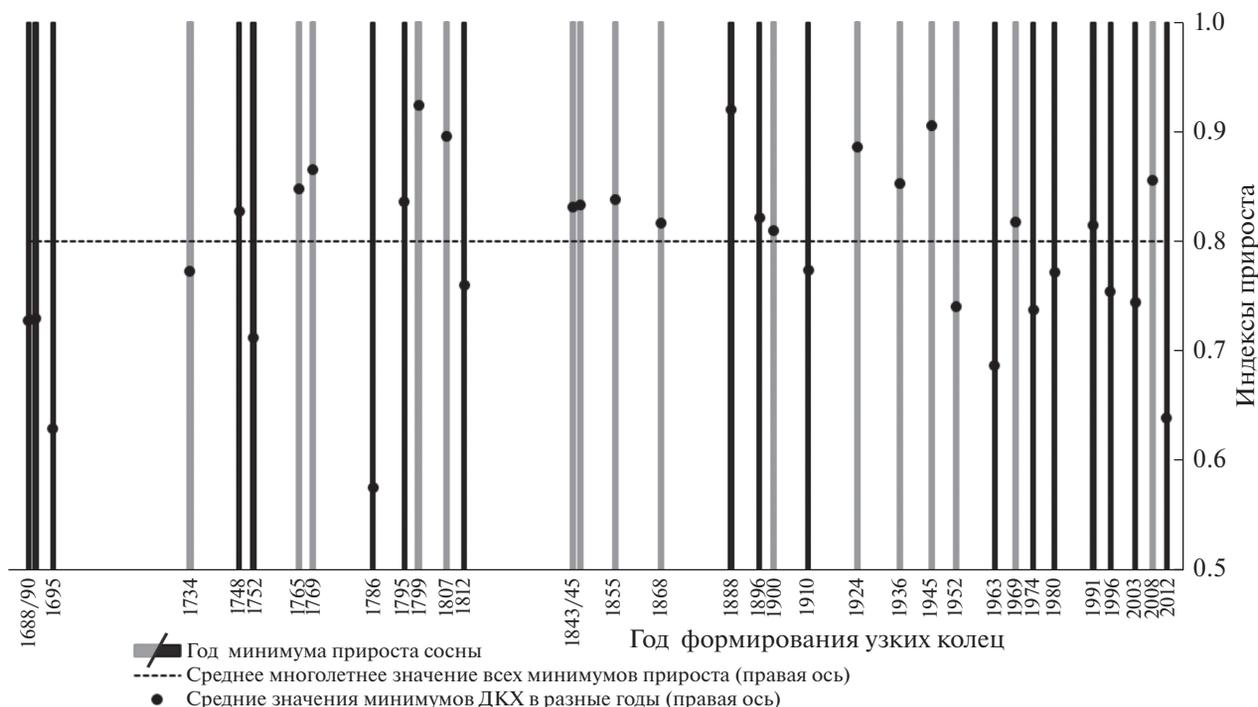


Рис. 2. Динамика минимумов радиального прироста сосны ленточных боров степной зоны юга Западной Сибири по годам (черные столбцы – узкое кольцо фиксируется у 75% хронологий, серые – 66.7%).

хих” дней в году (*CDD*), выделенных группой *CSI/CLIVAR* при поддержке *WMO* [35], рассчитанными по данным ГМС Славгород и Рубцовск за периоды 1960–2010 гг. (*HWDI*) и 1960–2018 гг. (*CDD*).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе выполненной работы были получены хронологии узких колец сосны для степной части Западной Сибири (рис. 2). Среднее значение индексов ширины узких годовичных колец составило 0.79, что на 20% меньше, чем среднее значение индексов (0.99–1.0) ширины годовичных колец всех обобщенных хронологий. За период (1685–2018 гг.), который представлен хотя бы 2 обобщенными ДКХ, было зафиксировано 34 минимума прироста. При этом в 18 случаях узкие годовичные кольца обнаружены у 75% всех хронологий: **2012**, 2003, 1996, 1991, 1980, 1974, **1963**, 1910, 1896, 1888, 1812, 1795, **1786**, 1752, 1748, **1695**, **1690** и **1688** гг. (жирным шрифтом выделены годы, когда минимумы прироста отмечены у всех (100%) хронологий). Эти годы определены как региональные реперные годы. 1963 г. является абсолютным репером для сосны ленточных боров. Кроме того, он представлен аномально узкими годовичными кольцами (с превышением отклонения от среднего на 1.5σ), подобное можно сказать и про 1786 г. В других

случаях аномально узкие кольца проявляются без выраженной концентрации по годам.

Также выделяются годы, когда по методу Кроппера узкие кольца можно выделить только у половины (50%) степных ДКХ, хотя у подавляющего большинства хронологий в этот год отмечается снижение прироста. К таким годам относятся 1985, 1959, 1955, 1940, 1892, 1878, 1860, 1820, 1803, 1780, 1742, 1730, 1720 гг. Спектральный анализ хронологий узких колец выявил, что основной высокочастотный вклад принадлежит циклам 2–3- и 5–6-летней продолжительности, также выделяется 11-летний цикл, наиболее низкочастотным циклом является 54-летний период.

Визуально (см. рис. 2) прослеживается увеличение частоты проявления узких колец во второй половине XX – первой половине XXI в. (также можно заметить, что наблюдается снижение среднего значения минимумов в этот временной отрезок относительно всего периода). Оценка изменения частоты образования узких годовичных колец во времени произведена путем подсчета количества узких колец по пятидесятилетиям в скользящем окне в 51 год. Полученные результаты подтвердили выше обозначенную особенность: во второй половине XX в. наблюдалось 8–9 узких колец в пятидесятилетие, что в 2 раза больше, чем в среднем формировалось в XIX в. (рис. 3). В целом на протяжении большей части XX в. (начиная с 30-х годов) фиксировалось 6 и более узких годович-

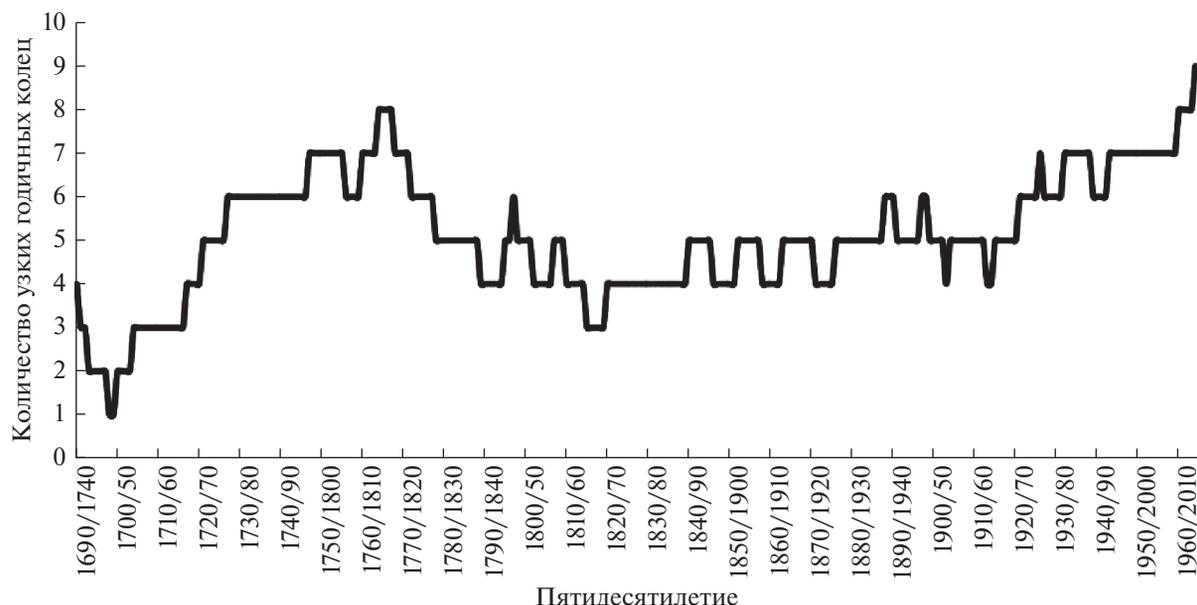


Рис. 3. Частота образования узких годовых колец у сосны ленточных боров степной зоны юга Западной Сибири.

ных колец по пятидесятилетиям. Подобная частота образования минимумов прироста деревьев приходится на отрезок времени с первой трети XVIII в. по начало XIX в. (до 20-х годов). При этом абсолютные значения ширины годовых колец (в мм), приходящихся на стадию зрелости деревьев (константы прироста), где влияние возрастных шумов минимально, во второй половине XVIII в. несколько меньше, чем во второй половине XX в. Во второй половине XX в. узкие кольца формировались чаще при общем увеличении ширины годового прироста, что говорит о возрастании экстремальности климата в этот период [7, 15]. Реже узкие годовые кольца фиксировались в конце XVII – начале XVIII в.

В степной зоне основной причиной образования узких годовых колец у деревьев являются засухи. В ходе дендроклиматического анализа установлено, что в годы образования узких годовых колец практически всегда (кроме 1969 г., который характеризуется как избыточно влажный [17]) отмечается снижение значений ГТК вегетационного периода (май–сентябрь), чаще всего с минимумом в первой его половине, а именно в мае (табл. 2). Также обнаруживается значительное снижение (менее половины от среднегодовой нормы) количества осадков в апреле и предшествующий осенне-зимний сезон (в половине случаев и во второй половине прошлого вегетационного периода), что типично для засушливых территорий [4]. Морозность предшествующих зим не является определяющим фактором в данном случае, хотя это также вносит свой вклад. Значимые корреляционные связи (0.6 при $p < 0.05$) были

установлены для хронологий минимумов прироста деревьев в сухостепной подзоне с ГТК вегетационного периода, мая и ГТК сентября предшествующего года.

Отдельно стоит сказать, что минимум 1969 г., предположительно, мог быть связан с массовым размножением насекомых-вредителей леса (есть сведения, что в указанный год в Алтайском крае сформировались крупные очаги распространения звездчатого пилильщика-ткача [6]).

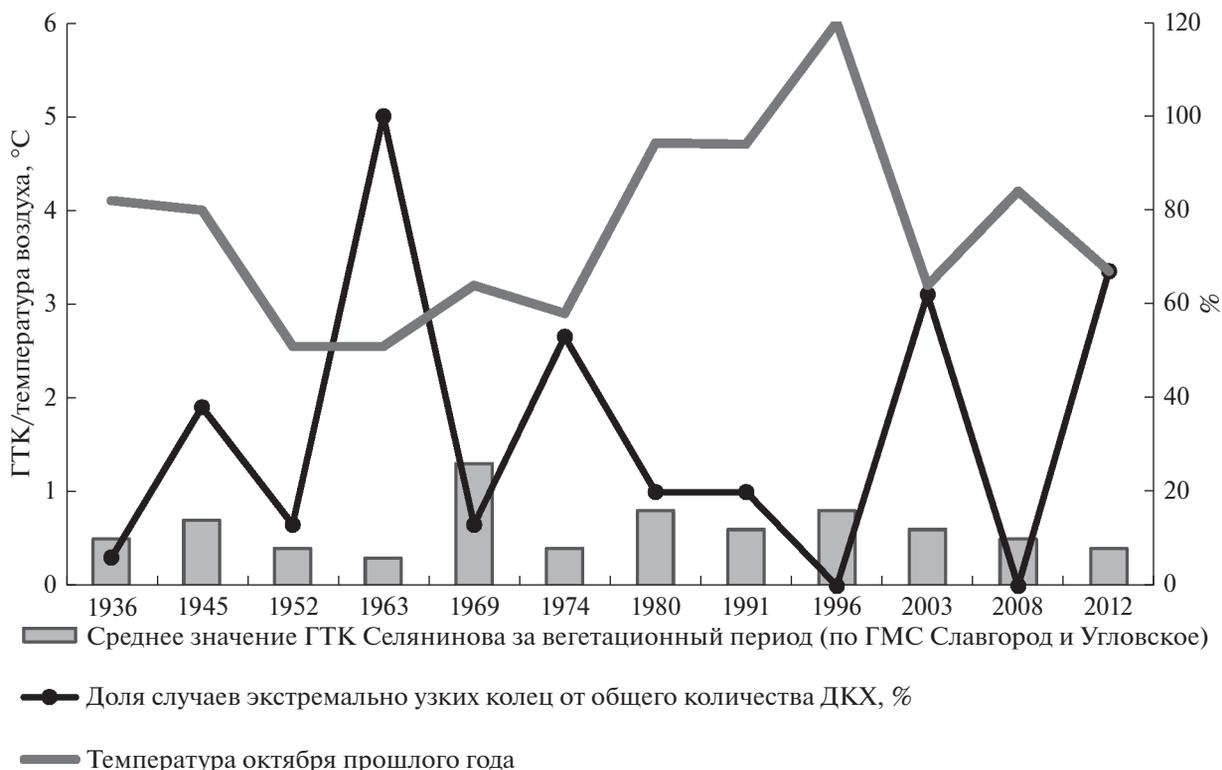
В степной зоне ряды метеорологических наблюдений ограничены тридцатыми годами XX в. Для выявления связи узких колец с засухами в прошлых столетиях были привлечены архивные данные по неурожайным годам в Сибири [14]. Так, в 1812, 1795, 1752 и 1748 гг. были отмечены неурожаи в Алтайском округе и на юге Западной Сибири. В Сибири (в Иркутской области) неурожаи были зафиксированы также в 1868, 1799, 1786, 1769, 1765 гг., на которые приходятся минимумы прироста сосны обыкновенной южной части ленточных боров.

Для определения возможности дендроиндикации интенсивности засух были сопоставлены средние значения ГТК, рассчитанные за вегетационный период по метеостанциям Волчиха, Славгород и Угловское, и процент ДКХ с аномально узкими кольцами (снижение значений прироста от среднего на 1.5σ от общего количества всех хронологий в годы минимумов прироста деревьев (рис. 4). Коэффициент корреляции этих двух показателей составил -0.42 , который при небольшой длине анализируемого ряда (12 лет) не является значимым (при $p < 0.05$). При этом вы-

Таблица 2. Климатическая характеристика периодов образования узких годичных колец у сосны ленточных боров степной зоны юга Западной Сибири (по данным метеостанций Волчиха, Угловское и Славгород)

Год минимального прироста	ГТК вегетационного периода		Минимальное значение ГТК за период (месяц)		Особенности предшествующего сезона (до вегетационного периода текущего года)	
	Волчиха	Угловское	Волчиха	Угловское	Мало осадков*	Морозные зимы**
2012	0.4	0.7	0.3 (V–VII)	0.2 (V)	X, XII–II, IV	I–II
2008	0.8	0.4	0.2 (V)	0.1 (V), 0.2 (VII)	VIII, I	I
2003	0.6	0.5	0.6 (VI)	0.1 (VI, VIII)	XII, IV	XII
1996	0.8	1.0	0.4 (VI)	0.3 (V, VIII)	V–VI, VIII–XI, I–IV	I, III
1991	0.5	0.4	0.2 (V)	0.2 (V, IX)	VI, IV	
1980	0.8	0.6	0.1 (V, IX)	0.1 (V), 0.05 (IX)	XII–IV	
1974	0.5	0.3	0.02 (V, VII)	0.02 (V, VII)	XII, IV	I–II
1969	1.3	1.3	0.8 (VI)	0.8 (VI)	VIII	–
1963	0.6	0.3	0.2 (V–VII)	0.06–0.07 (V–VI), 0.2 (VII)	VIII, XI, I, IV	
1952	0.4	0.2	0.1(VII)/0.2 (V)	0.15 (VIII)	VIII–IX, II	II–III
1945	0.7	0.7 ^S	0.1 (VI)	0.3 (VII) ^S	I–III	XI–II
1936	0.8	0.5 ^S	0.1 (VI)	0.2 (VIII)/0.3 (VI) ^S	XI–XII, II, IV	

^S данные по ГМС Славгород; * снижение осадков на 50% от многолетней месячной нормы (катастрофическая засухливость); ** снижение среднемесячной температуры воздуха на 1σ от 30-летней месячной нормы; жирным шрифтом выделены месяцы предыдущего года.

**Рис. 4.** Значения ГТК Селянинова в годы формирования anomalно узких годичных колец сосны ленточных боров степной зоны юга Западной Сибири и температура октября предшествующего года.

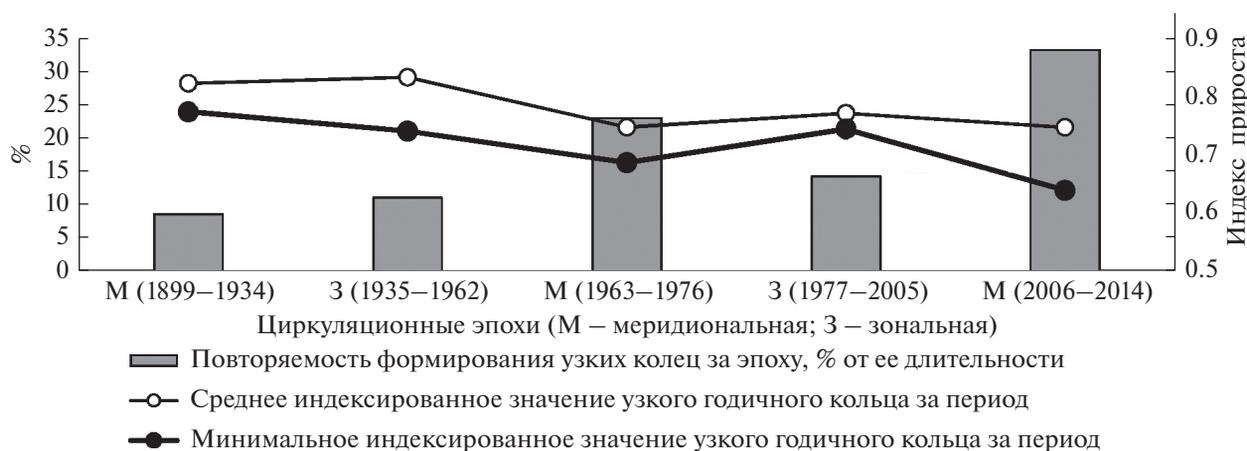


Рис. 5. Соотношение количества и значений узких годичных колец у сосны ленточных боров степной зоны юга Западной Сибири в разные циркуляционные эпохи.

явлена значимая связь ($r = -0.61$, $p < 0.05$) температуры октября прошлого года с частотой формирования anomalно узких годичных колец у сосны. Это свидетельствует о значимости климатических факторов предыдущего года, прежде всего тех, которые определяют условия перехода дерева в состояние зимнего покоя. Таким образом, можно заключить, что в засушливых условиях, когда локальные природно-климатические факторы играют большую роль в формировании прироста деревьев, и разреженной сети метеостанций невозможно установить градиентную зависимость флуктуации ширины узких годичных колец сосны ленточных боров от силы (глубины) засухи.

Также была проверена гипотеза о влиянии на прирост сосны таких экстремальных климатических явлений, как “волны тепла” (*HWDI*) [7] и максимальное количество последовательных “сухих” дней в году (*CDD*), которые могут быть рассмотрены в качестве проявлений засушливых явлений на территории. Из 9 лет, когда отмечено формирование узких годичных колец (за период, обеспеченный указанными данными), в 2/3 случаях для ГМС Славгорода и в 3/4 для ГМС Рубцовска фиксируется повышение (в сравнении со среднеголетними значениями) *CDD*. Зависимости между значениями индекса *HWDI* и минимумами радиального прироста не выявлено: на годы формирования узких годичных колец только в двух случаях из восьми (1/4) приходится значительная продолжительность (больше среднеголетней) “волн тепла” (по обоим метеостанциям выделяется реперный 1963 г.). Можно заключить, что сосна ленточных боров обладает низкой чувствительностью к проявлениям “волн тепла”, при этом продолжительные периоды без дождей уменьшают прирост сосны.

Ранее неоднократно была отмечена связь типов атмосферной циркуляции и проявления экстремальных климатических явлений, в том числе засух [2, 23]. Поэтому была проведена оценка частоты формирования узких годичных колец в различные циркуляционные эпохи [5]. На территории Сибири с 1899 по 2017 г. выделено 5 периодов с преобладанием широтных (2 периода) и меридиональных (3) циркуляционных процессов [8]. В рамках каждого была проанализирована частота проявления минимумов прироста во всех ДКХ, а также подсчитаны их средние и минимальные индексированные значения. Полученные результаты (рис. 5) показали увеличение частоты формирования узких колец (а также снижение их размера) в меридиональные южные эпохи, к которым относятся периоды второй половины XX в. Первая меридиональная эпоха, выделяемая для территории Сибири в начале прошлого столетия, была северной (эпоха блокирующих процессов) и характеризовалась общим похолоданием. В этом периоде не выражена концентрация минимумов прироста, что подтверждается метеорологическими данными (в первой трети XX в. не наблюдалось выраженных засушливых явлений в Алтайском крае [17]). Стоит отметить, что на временных отрезках смен циркуляционных эпох фиксируется от одного до нескольких узких колец. Полученные выводы согласуются с результатами исследования связи меридиональных циркуляционных процессов с летними засухами в Западной Сибири и Казахстане [9] и отличаются от полученных ранее [23] для европейской территории России (ЕТР), где частота опасных атмосферных засух выше при преобладании широтных циркуляционных процессов. Для установления зависимостей между циркуляционными

процессами и формированием засушливых условий необходимо анализировать погодичное соотношение типов циркуляции на данной территории, так как проведенные исследования [8] показали отличие циркуляционных процессов, наблюдаемых в Сибири, от проходящих на территории Евразии, в том числе на ЕТР.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Созданная трехсотлетняя хронология узких годичных колец сосны степной зоны юга Западной Сибири позволяет проводить ретроспективные исследования климатических аномалий, прежде всего засух. В проявлении минимумов прироста во времени выделяются внутривековые 2–3-, 5–6-, 11- и 54-летние циклы, более длительные циклы не фиксируются из-за ограниченности длины хронологий. При этом отмечается увеличение частоты минимумов радиального прироста во второй половине XX в., а также во второй половине XVIII – начале XIX в. Наименьшее количество узких колец деревьев приходится на конец XVII – начало XVIII в.

Увеличение частоты формирования узких колец в конце XX в. свидетельствует об увеличении экстремальности климатических условий за последние три столетия. Наибольшая концентрация минимумов прироста отмечается в периоды повышения температуры воздуха и наоборот, что наблюдается и в настоящее время. Результаты анализа распределения узких колец во времени согласуются с палеоклиматическими данными смены теплых и холодных периодов, полученными для Алтая различными методами (по древесно-кольцевым хронологиям [21], данным ледникового ядра Белухи и донным отложениям Теллецкого озера [16]).

Формирование узких годичных колец определяется снижением увлажнения территории (засухами) в течение текущего вегетационного периода и во второй половине предыдущего, а также снижением количества осадков в предшествующий зимний сезон. Установлена значимая корреляционная зависимость ($r = 0.6$, $p < 0.05$) ширины узких годичных колец сосны сухостепной подзоны района исследований от величины ГТК Селянинова вегетационного периода в год формирования минимума прироста, ГТК мая текущего и ГТК сентября предыдущего года.

Сопоставление частоты проявления минимумов прироста в периоды разных циркуляционных эпох позволило выявить определенные закономерности: концентрация узких годичных колец в ДКХ приурочена к периоду преобладания южных меридиональных циркуляционных процессов на территории Западной Сибири, которые, в свою

очередь, предопределяют неблагоприятные засушливые явления.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Публикация подготовлена при финансовой поддержке РФФИ в рамках реализации проекта № 18-05-00694_а.

FUNDING

The study was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research (project no. 18-05-00694_a).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алтайский край. Атлас. Т. I. М.–Барнаул: ГУГК, 1978. 222 с.
2. Барашкова Н.К. Состояние глобальной циркуляции и экстремальные условия погоды на юге Западной Сибири // География и природные ресурсы. 2002. № 3. С. 64–68.
3. Демидко Д.А., Кривец С.А., Бисирова Э.М. Связь радиального прироста и жизненного состояния у деревьев кедра сибирского // Вестн. Томского ун-та. Сер. биол. 2010. № 4 (12). С. 68–80.
4. Демина А.В., Белокопытова Л.В., Андреев С.Г., Костякова Т.В., Бабушкина Е.А. Динамика радиального прироста сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) как индикатор гидротермического режима лесостепи Западного Забайкалья // Сиб. экол. журн. 2017. Т. 24. № 5. С. 553–566.
5. Дзердзеевский Б.Л. Общая циркуляция атмосферы и климат. М.: Наука, 1975. 285 с.
6. Звездчатый пилльщик-ткач: вредоносность, лесопатологические обследования в очагах и меры защиты / ред. Ю.И. Гниненко, Г.А. Серый, Е.Ю. Бондаренко. Пушкино: ВНИИЛМ, 2015. 60 с.
7. Козлова Д.С., Харламова Н.Ф. Изменения показателей экстремальности климата Алтайского края за период 1960–2010 гг. // Изв. Алтайского отд. РГО. 2013. № 34. С. 105–108.
8. Кононова Н.К. Типы глобальной циркуляции атмосферы: результаты мониторинга и ретроспективной оценки за 1899–2017 гг. // Фундаментальная и прикладная климатология. 2018. № 3. С. 108–123.
9. Кулундинская степь и вопросы ее мелиорации / отв. ред. П.Я. Полубаринова-Кочина. Новосибирск: Наука, 1972. 506 с.
10. Кучеров С.Е., Мулдашев А.А. Радиальный прирост сосны обыкновенной в районе Карабашского медеплавильного комбината // Лесоведение. 2003. № 2. С. 43–49.
11. Магда В.Н., Ойдунаа О.Ч., Блок Й. Исследование географических особенностей климатического сигнала древесно-кольцевых хронологий методом кластерного анализа // Изв. РГО. 2004. Т. 136. Вып. 6. С. 46–53.

12. *Мальшиева (Рыгалова) Н.В., Быков Н.И.* Дендрохронологические исследования ленточных боров юга Западной Сибири. Барнаул: Азбука, 2011. 125 с.
13. *Матвеев С.М., Матвеева С.В., Шурыгин Ю.Н.* Повторяемость сильных засух и многолетняя динамика радиального прироста сосны обыкновенной в Усманском и Хреновском борах Воронежской области // Журн. Сиб. фед. ун-та. Сер. биол. 2012. № 5. С. 27–42.
14. *Мыглан В.С.* Климат и социум Сибири в малый ледниковый период. Красноярск: Сиб. фед. ун-т, 2010. 230 с.
15. *Огурицов Л.А., Чередыко Н.Н., Волкова М.А., Журавлев Г.Г.* Динамика показателей экстремальности климата на территории Западной Сибири // Оптика атмосферы и океана. 2016. Т. 29. № 8. С. 633–639.
16. *Папина Т.С., Малыгина Н.С., Митрофанова Е.Ю.* Сравнение реконструкций изменения температуры на Алтае за последние 750 лет по данным с ледника на горе Белуха и донным осадкам Телецкого озера // Лёд и Снег. 2011. № 1 (113). С. 114–118.
17. *Ревякин В.С., Харламова Н.Ф.* Особенности засушливого климата на территории Алтайского края // Кулундинская степь: прошлое, настоящее, будущее. Барнаул: Изд-во Алтайского ун-та, 2003. С. 305–312.
18. *Румянцев Д.Е., Кухта А.Е., Пучинская Д.В.* Климатический сигнал засух в хронологии ели из ксилитического типа леса Центрально-лесного заповедника // Вестн. Моск. гос. ун-та леса – Лесной вестник. 2016. Т. 20. № 2. С. 36–43.
19. *Рыгалова Н.В., Быков Н.И.* Пространственно-временная изменчивость климатического сигнала древесно-кольцевых хронологий ленточных и Приобских боров // Журн. Сиб. фед. ун-та. Сер. биол. 2015. Т. 8. № 4. С. 394–409.
20. *Соломина О.Н. и др.* Засухи Восточно-Европейской равнины по гидрометеорологическим и дендрохронологическим данным. М.–СПб.: Нестор-История, 2017. 360 с.
21. *Тайник А.В., Мыглан В.С., Баринов В.В., Назаров А.Н., Азатова А.Р., Непон Р.К.* Прирост лиственницы сибирской (*Larix sibirica* Ldb.) на верхней границе леса в Республике Алтай // Изв. РАН. Сер. геогр. 2015. № 6. С. 61–71.
22. *Хантемиров Р.М., Горланова Л.А., Сурков А.Ю., Шиятов С.Г.* Экстремальные климатические события на Ямале за последние 4100 лет по дендрохронологическим данным // Изв. РАН. Сер. геогр. 2011. № 2. С. 89–102.
23. *Черенкова Е.А., Кононова Н.К.* Связь атмосферных засух в Европейской России в XX веке с макроциркуляционными процессами // Изв. РАН. Сер. геогр. 2009. № 1. С. 73–82.
24. *Шиятов С.Г. и др.* Методы дендрохронологии. Ч. I. Красноярск: Изд-во КрасГУ, 2000. 80 с.
25. *Babushkina E.A., Zhirnova D.F., Belokopytova L.V., Tychkov I.I., Vaganov E.A., Krutovsky K.V.* Response of four tree species to changing climate in a moisture-limited area of South Siberia // Forests. 2019. V. 10. № 11. 99 p.
26. *Bloomfield P.* Fourier Analysis of Time Series: An Introduction. John Wiley & Sons Publ., 2000. 275 p.
27. *Cook E.R., Kairiukstis L.* Methods of Dendrochronology: applications in environmental sciences. Dordrecht, Boston, London: Kluwer Acad. Publ., 1990. 394 p.
28. *Cropper J.P.* Tree-ring skeleton plotting by computer // Tree-Ring Bull. 1979. V. 39. P. 47–60.
29. *He M., Bräuning A., Gießinger J., Hochreuther P., Wernicke J.* May–June drought reconstruction over the past 821 years on the south-central Tibetan Plateau derived from tree-ring width series // Dendrochronologia. 2018. V. 47. P. 48–57.
30. *Holmes R.L.* Computer-assisted quality control in tree-ring data and measurement // Tree-Ring Bull. 1983. V. 43. P. 69–78.
31. *Jetschke G., Maaten E., Maaten-Theunissen M.* Towards the extremes: A critical analysis of pointer year detection methods // Dendrochronologia. 2019. V. 53. P. 55–62.
32. *Kopabayeva A., Mazarzhanova K., Köse N., Akkemik Ü.* Tree-ring chronologies of *Pinus sylvestris* from Burabai Region (Kazakhstan) and their response to climate change // Dendrobiology. 2017. V. 78. P. 96–110.
33. *Koprowski M., Przybylak R., Zielski A., Pospieszynska A.* Tree rings of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) as a source of information about past climate in northern Poland // Int. J. of Biometeorology. 2012. V. 56 (1). P. 1–10.
34. *Kostyakova T.V., Babushkina E.A., Belokopytova L.V., Touchan R.* Precipitation reconstruction for the Khakassia region, Siberia, from tree rings // The Holocene. 2018. V. 3 (28). P. 377–385.
35. *Peterson T.C., Folland Ch., Gruza G., Hogg W., Mokssit A., Plummer N.* Report on the Activities of the Working Group on Climate Change Detection and Related Rapporteurs 1998–2001. WMO, Rep. WCDMP-47, WMO-TD 1071, Geneva, Switzerland. 143 p. <http://etccdi.pacificclimate.org/docs/wgccd.2001.pdf>
36. *Rinn F.* TSAP V3.5. Computer program for tree-ring analysis and presentation. Heidelberg: Frank Rinn Distribution, 1996. 264 p.
37. *Risio Allione L., Lara W.H., Bogino S., Bravo F.* How aridity variations affect *Prosopis caldenia* growth in transitional forests in the semiarid Argentinean Pampas // Dendrochronologia. 2018. V. 50. P. 126–133.
38. *St. George S. et al.* The Tree-Ring Record of Drought on the Canadian Prairies // J. Climate. 2009. V. 22. P. 689–710.
39. *Tabakova M.A., Arzac A., Martínez E., Kirilyanov A.V.* Climatic factors controlling *Pinus sylvestris* radial growth along a transect of increasing continentality in southern Siberia // Dendrochronologia. 2020. V. 62. 125709.
40. *Ward J.H.* Hierarchical grouping to optimize an objective function // J. American Statistical Association. 1963. V. 58. Iss. 301. P. 236–244.

Spatiotemporal Analysis of the Formation of Narrow Tree-Rings of Pine Belt Forests in the Steppe Zone of Western Siberia

N. V. Rygalova^{1,*} and N. F. Kharlamova¹

¹Altai State University, Barnaul, Russia

*e-mail: natalia.ml@mail.ru

This article presents the results of the study of narrow pine tree-rings (*Pinus sylvestris* L.) of the belt forests (south of Western Siberia) in the steppe zone for the period from 1661 to 2019. In the analysis 19 tree-ring chronologies obtained from living trees and historical wood of old rural houses have been used. Narrow tree-rings in 75% of all chronologies have been noted for 2012, 2003, 1996, 1991, 1980, 1974, 1963, 1910, 1896, 1888, 1812, 1795, 1786, 1752, 1748, 1695, 1690 and 1688, which can be defined as regional pointer years. The increase in the frequency of formation of minimum radial growth in the second half of the 20th century, as well as in the second half of the 18th–early 19th centuries has been distinguished. The minimum number of narrow rings falls on the end of the 17th century—the beginning of the 18th century. Drought in the spring and summer period (especially in May) has been observed in the years of narrow rings formation in almost 100% of cases. Also significant is the deficit of precipitation in the preceding autumn–winter season. It has been established that the maximum concentration of pine growth minima falls on the periods of dominance of southern meridional circulation epochs.

Keywords: Narrow tree-rings, Scots pine, tree-ring chronology, pine belt forests, historical wood, drought, semi-arid territory, circulation epochs, pointer year

REFERENCES

1. *Altayskii krai. Atlas* [Altai krai. Atlas]. Moscow, Barnaul: GUGK Publ., 1978, vol. 1. 222 p.
2. Barashkova N.K. State of global circulation and extreme weather conditions in the south of Western Siberia. *Geogr. Prir. Resur.*, 2002, no. 3, pp. 64–68. (In Russ.).
3. Demidko D.A., Krivets S.A., Bisirova E.M. Connection between radial increment and tree vitality of Siberian stone pine. *Vestn. Tomsk. Gos. Univ., Ser. Biol.*, 2010, vol. 12, no. 4, pp. 68–80. (In Russ.).
4. Demina A.V., Belokopytova L.V., Andreev S.G., Kostyakova T.V., Babushkina E.A. Radial increment dynamics of scots pine (*Pinus sylvestris* L.) as an indicator of hydrothermal regime of the Western Transbaikalia forest steppe. *Sib. Ekol. Zh.*, 2017, vol. 24, no. 5, pp. 553–566. (In Russ.).
5. Dzerdzevskii B.L. *Obshchaya tsirkulyatsiya atmosfery i klimat* [General Atmospheric Circulation and Climate]. Moscow: Nauka Publ., 1975. 285 p.
6. *Zvezdchatyi pilil'shchik-tkach: vredonosnost', lesopatologicheskie obsledovaniya v ochagakh i mery zashchity* [Acantholyda posticalis: Harmfulness, Forest Pathology Examinations in Hearths and Protection Measures]. Gninenko Yu.I., Seryi G.A., Bondarenko E.Yu., Eds. Pushkino: VNIILM, 2015. 60 p.
7. Kozlova D.S., Kharlamova N.F. Changes in the Altai krai's climate extremes over the period 1960–2010. *Izv. Altai. Otd. Russ. Geogr. O-va*, 2013, vol. 34, no. 1, pp. 105–108. (In Russ.).
8. Kononova N.K. Types of global atmospheric circulation: results of monitoring and retrospective assessment for 1899–2017. *Fundam. Prikl. Klimatol.*, 2018, no. 3, pp. 108–123. (In Russ.).
9. *Kulundinskaya step' i voprosy ee melioratsii* [Kulunda Steppe and Land Reclamation Issues]. Polubarinova-Kochina P.Ya., Ed. Novosibirsk: Nauka Publ., 1972. 506 p.
10. Kuchеров S.E., Muldashev A.A. Radial growth of ordinary pine in the area of Karabash copper smelting plant. *Lesovedenie*, 2003, no. 2, pp. 43–49. (In Russ.).
11. Magda V.N., Oidupaa O.Ch., Blok I. Study of geographical features of the climatic signal of tree-ring chronologies by methods of cluster analysis. *Izv. Russ. Geogr. O-va*, 2004, vol. 136, no. 6, pp. 46–53. (In Russ.).
12. Malysheva (Rygalova) N.V., Bykov N.I. *Dendrokronologicheskie issledovaniya lentochnykh borov yuga Zapadnoi Sibiri* [Dendrochronological Studies of the Pine Belt Forests in the South of Western Siberia]. Barnaul: Azbuka Publ., 2011. 125 p.
13. Matveev S.M., Matveeva S.V., Shurygin Y.N. Repetitiveness of severe droughts and long-term dynamics of radial growth of ordinary pine in Usman and Khrenov pine forests of Voronezh oblast. *Zh. Sib. Fed. Univ., Ser. Biol.*, 2012, no. 5, pp. 27–42. (In Russ.).
14. Myglan V.S. *Klimat i sotsium Sibiri v malyi lednikovyi period* [Siberia's Climate and Society in the Little Ice Age]. Krasnoyarsk: Sib. Fed. Univ., 2010. 230 p.
15. Ogurtsov L.A., Cheredko N.N., Volkova M.A., Zhuravlev G.G. Dynamics of climate extremes in Western Siberia. *Optika Atmosfery i Okeana*, 2016, vol. 29, no. 8, pp. 633–639. (In Russ.).
16. Papina T.S., Malygina N.S., Mitrofanova E.Yu. Comparison of temperature change reconstructions in Altai over the last 750 years according to the data from the Belukha glacier and bottom sediments of the Teletskoye Lake. *Led i Sneg*, 2011, vol. 113, no. 1, pp. 114–118. (In Russ.).
17. Revyakin V.S., Kharlamova N.F. Features of arid climate in the Altai krai. In *Kulundinskaya step': proshloe, nastoyashchee, budushchee* [Kulunda Steppe: Past,

- Present, Future]. Barnaul: Altai. Univ., 2003, pp. 305–312. (In Russ.).
18. Rumyantsev D.E., Kukhta A.E., Puchinskaya D.V. Climatic signal of droughts at the Norway spruce chronology from oxalis acetosella site in Central forest reserve. *Vestn. Mosk. Gos. Univ. Lesa – Lesnoi Vestn.*, 2016, vol. 20, no. 2, pp. 36–43. (In Russ.).
 19. Rygalova N.V., Bykov N.I. Spatiotemporal variation of the climatic signal of tree-rings chronology of the pine belt and pine forests in the Ob region. *Zh. Sib. Fed. Univ., Ser. Biol.*, 2015, vol. 8, no. 4, pp. 394–409. (In Russ.).
 20. Solomina O. et al. *Zasukhi Vostochno-Evropeiskoi ravniny po gidrometeorologicheskim i dendrokronologicheskim dannym* [Droughts of the East European Plain According to Hydrometeorological and Tree-Ring Data]. Moscow, St. Petersburg: Nestor-Istoriya Publ., 2017. 360 p.
 21. Tainik A.V., Myglan V.S., Barinov V.V., Nazarov A.N., Agatova A.R., Nepop R.K. Tree-ring growth of Siberian larch at the upper treeline in the Altai Republic. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2015, no. 6, pp. 61–71. (In Russ.).
 22. Khantemirov R.M., Gorlanova L.A., Surkov A.Yu., Shiyatov S.G. Extreme climate events on Yamal for the last 4100 years according to dendrochronological data. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2011, no. 2, pp. 89–102. (In Russ.).
 23. Cherenkova E.A., Kononova N. K. Relationship between atmospheric droughts in European Russia in the 20th century and macrocirculation processes. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2009, no. 1, pp. 73–82. (In Russ.).
 24. Shiyatov S.G. et al. *Metody dendrokronologii* [Methods of Dendrochronology]. Krasnoyarsk: Krasnoyarsk Univ. Publ., 2000, vol. 1. 80 p.
 25. Babushkina E.A., Zhirnova D.F., Belokopytova L.V., Tychkov I.I., Vaganov E.A., Krutovsky K.V. Response of four tree species to changing climate in a moisture-limited area of South Siberia. *Forests*, 2019, vol. 10, no. 11, 999. doi 10.3390/f10110999
 26. Bloomfield P. *Fourier Analysis of Time Series: An Introduction*. John Wiley & Sons Publ., 2000. 275 p.
 27. Cook E.R., Kairiukstis L. *Methods of Dendrochronology: Applications in Environmental Sciences*. Dordrecht, Boston, London: Kluwer Acad. Publ., 1990. 394 p.
 28. Cropper J.P. Tree-ring skeleton plotting by computer. *Tree-Ring Bull.*, 1979, vol. 39, pp. 47–60.
 29. He M., Bräuning A., Gießinger J., Hochreuther P., Wernicke J. May–June drought reconstruction over the past 821 years on the south-central Tibetan Plateau derived from tree-ring width series. *Dendrochronologia*, 2018, vol. 47, pp. 48–57.
 30. Holmes R.L. Computer-assisted quality control in tree-ring data and measurement. *Tree-Ring Bull.*, 1983, vol. 43, pp. 69–78.
 31. Jetschke G., Maaten E., Maaten-Theunissen M. Towards the extremes: A critical analysis of pointer year detection methods. *Dendrochronologia*, 2019, vol. 53, pp. 55–62.
 32. Kopabayeva A., Mazarzhanova K., Köse N., Akkemik Ü. Tree-ring chronologies of *Pinus sylvestris* from Burabai Region (Kazakhstan) and their response to climate change. *Dendrobiol.*, 2017, vol. 78, pp. 96–110.
 33. Koprowski M., Przybylak R., Zielski A., Pospieszńska A. Tree rings of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) as a source of information about past climate in northern Poland. *Int. J. Biometeorol.*, 2012, vol. 56, no. 1, pp. 1–10.
 34. Kostyakova T.V., Babushkina E.A., Belokopytova L.V., Touchan R. Precipitation reconstruction for the Khakassia region, Siberia, from tree rings. *The Holocene*, 2018, vol. 28, no. 3, pp. 377–385.
 35. Peterson T.C., Folland C., Gruza G., Hogg W., Moksit A., Plummer N. *Report on the Activities of the Working Group on Climate Change Detection and Related Reports 1998–2001*. ICPO Publication Series, no. 48. Geneva: WMO, 2001. 143 p. Available at: <http://etc-cdi.pacificclimate.org/docs/wgccd.2001.pdf> (accessed: 08.11.2020).
 36. Rinn F. *TSAP V3.5. Computer Program For Tree-Ring Analysis and Presentation*. Heidelberg: Frank Rinn Distribution, 1996. 264 p.
 37. Allione L.R., Lara W.H., Bogino S., Bravo F. How aridity variations affect *Prosopis caldenia* growth in transitional forests in the semiarid Argentinean Pampas. *Dendrochronologia*, 2018, vol. 50, pp. 126–133.
 38. St. George S., Meko D.M., Girardin M.P. et al. The tree-ring record of drought on the Canadian Prairies. *J. Clim.*, 2009, vol. 22, no. 3, pp. 689–710.
 39. Tabakova M.A., Arzac A., Martínez E., Kirilyanov A.V. Climatic factors controlling *Pinus sylvestris* radial growth along a transect of increasing continentality in southern Siberia. *Dendrochronologia*, 2020, vol. 62, 125709. doi 10.1016/j.dendro.2020.125709
 40. Ward J.H. Hierarchical grouping to optimize an objective function. *J. Am. Stat. Assoc.*, 1963, vol. 58, no. 301, pp. 236–244.