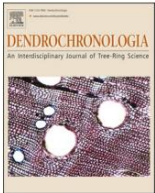




Списки содержания доступны на [сайте ScienceDirect](#)

Дендрохронология

Домашняя страница журнала: www.elsevier.com/locate/dendro



Измерения интенсивности синего цвета годовичных колец деревьев на участках вдоль линии роста деревьев на Урале Горы демонстрируют сильный сигнал летней температуры

Виктория В. Агапова^a, Альберто Арзак а,^{*}*, Владимир В. Кукарских а,б, Ульф Бюнтген^{в,г,д,е},
Ян Эспер^{а,в,з}, Александр Владимирович Кирдянов^{а,в,з}

^а Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия
^б Институт экологии растений и животных УрО РАН, Екатеринбург, Россия
^с Географический факультет Кембриджского университета, Кембридж, Великобритания
^г Швейцарский федеральный научно-исследовательский институт (WSL), Бирменсдорф, Швейцария
^д Центр исследования глобальных изменений, Чешская академия наук, Брно, Чешская Республика
^е Кафедра географии, факультет естественных наук, Университет имени Масарика, Брно, Чешская Республика
^г Географический факультет, Университет Иоганна Гутенберга, Майнц, Германия
^з Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр СО РАН», Красноярск, Россия

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

Ключевые слова:
Изменение климата
Ранний лес
Лиственница сибирская
Латвуд
Ширина годовичного кольца
Плотность древесины

АБСТРАКТНЫЙ

Высокие северные широты предлагают идеальную среду для анализа реакции роста деревьев на беспрецедентное недавнее потепление. В этом исследовании мы впервые изучаем дендроклиматологический потенциал интенсивности синего цвета поздней древесины (LWBI) и интенсивности дельта-синего цвета (DBI) на двух участках лиственницы сибирской (*Larix sibirica* Ledeb.) в экотоне верхней границы леса Уральских гор на севере России. Чтобы оценить климатические сигналы, закодированные в LWBI и DBI, а также ширину годовичных колец (TRW) и максимальную плотность поздней древесины (MXD), мы сопоставили эти хронологии, специфичные для параметров, со средними ежемесячными температурами, суммами осадков и индексом SPEI. LWBI и DBI демонстрируют надежные и стабильные положительные корреляции с летней температурой, выше, чем TRW, но немного ниже, чем MXD на обоих участках, с незначительными отрицательными эффектами от осадков и сильными отрицательными корреляциями с SPEI. В качестве прямых заменителей MXD, LWBI и DBI из лиственниц предлагают разумные альтернативы в качестве индикаторов температур в северных широтах.

1. Введение

.. Линии роста деревьев представляют собой среду с ограниченной температурой (Hansson et al., 2021; Esper et al., 2009; MacDonald et al., 2004; Paulsen and Korner, 2004; Esper et al., 2009; MacDonald et al., 2008). Глобальное потепление влияет на динамику и пределы распространения экотонных линий роста деревьев во всем мире (Greenwood and Jump, 2014; Korner, 2021), изменяя рост деревьев, фенологию и производительность (Hansson et al., 2021). В частности, Северная Россия испытала беспрецедентное потепление за последние десятилетия (Ciavarella et al., 2021; Overland and Wang, 2021; Rantanen et al., 2022), значительно превысив глобальное среднее (МГЭИК, 2023; Виноградова и др., 2021) и достигнув температур выше, чем за последние два-семь тысячелетий (Esper et al., 2024; Hantemirov et al., 2022). Таким образом, российские лесные линии являются идеальными тестовыми рамками для изучения навыков устоявшихся и новых температурных прокси и изучения потенциально нестационарных деревьев

рост в ответ на изменение климата.

Ширина годовичного кольца (TRW) и максимальная плотность поздней древесины (MXD) являются широко используемыми климатическими показателями с высоким разрешением (Эспер и др., 2012, 2014; Кирдянов и др., 2007; Рыдвал и др., 2015; Шнайдер и др., 2015; Швайнгрубер и др., 1978; Швайнгрубер, 1988;). TRW особенно полезен в условиях ограниченных температур и воды (St. George, 2014) и широко применяется для реконструкции прошлой изменчивости климата, давая детальное представление об исторических климатических моделях и тенденциях (Büntgen et al., 2021; Esper et al., 2002; Fritts, 1976; Hantemirov et al., 2021, 2022; Hantemirov and Shiyatov, 2002). Однако на температурные реконструкции на основе TRW может влиять биологическая память (Esper et al., 2015) и другие внешние воздействия, такие как нашествия насекомых (Barchenkov et al., 2023; 2007), болезни (Cherubini et al., 2002) и загрязнение (Kirdyanov et al., 2020). Напротив, MXD менее подвержен влиянию неклиматических факторов и, следовательно, в целом более пригоден для дендроклиматических исследований (Anchukaitis et al., 2013, 2014).

* Автор-корреспондент.
Адрес электронной почты: aarzac@gmail.com (А. Арзак).

<https://doi.org/10.1016/j.dendro.2024.126267>

Получено 18 марта 2024 г.; Получено в измененном виде 12 сентября 2024 г.; Принято 16 сентября 2024 г. Доступно онлайн 17 сентября 2024 г.

1125-7865/© 2024 Elsevier GmbH. Все права защищены, включая права на интеллектуальный анализ текста и данных, обучение ИИ и аналогичные технологии.

2002, 2016). MXD использовался для реконструкции температуры теплого сезона в Северном полушарии (Davi et al., 2003; Esper et al., 2010; Grudd, 2008), включая Россию (Briffa et al., 2013; Schneider et al., 2015). Тем не менее, методология создания наборов данных MXD является трудоемкой, технически сложной и дорогой по сравнению с измерениями TRW (Bjorklund et al., 2019; Büntgen et al., 2007; Linderholm et al., 2010; Schweingruber, 1988; Zang and Biondi, 2013).

Интенсивность синего цвета поздней древесины (LWBI) и интенсивность синего цвета дельта (DBI) набирают популярность в дендроклиматических исследованиях как экономически эффективные заменители MXD, предоставляя схожую информацию (Bjorklund et al., 2019). Интенсивность синего цвета (BI) относится к инвертированному состоянию отраженного света в синем спектре от оцифрованного образца древесины RGB (Bjorklund et al., 2024), а DBI представляет собой высокочастотную разницу между интенсивностью синего цвета поздней древесины и ранней древесины (Bjorklund et al., 2014, 2024). Эти параметры широко использовались в Северной Америке (Babst et al., 2016; Heeter et al., 2021; Wilson et al., 2014, 2017) и Европе (Akhmetzyanov et al., 2020; Bjorklund et al., 2014, 2015; Frank and Nicolussi, 2020; Jiang et al., 2022; Reid and Wilson, 2020; Rydval et al., 2014; Seftigen et al., 2020) в качестве косвенных показателей температуры, засухи и осадков. Однако России уделяется меньше внимания: ограниченные исследования проводятся в Горном Алтае (Дэви и др., 2021), Центральной Сибири (Мыглан и др., 2018), на Белом море (Семеняк и Долгова, 2023) и на Северном Кавказе (Долгова, 2016).

В этом исследовании мы изучаем дендроклиматологический потенциал LWBI и DBI, измеренный у лиственницы сибирской (*Larix sibirica* Ledeb.) из двух участков верхней границы леса с ограниченной температурой в Уральских горах, и сравниваем эти новые данные с TRW и MXD. Северные Уральские горы, от арктической тундры до лесов умеренного пояса, особенно подходят для дендроклиматических исследований из-за суровых условий роста с ограниченной температурой (Devi et al., 2008; Hagedorn et al., 2014). Предыдущие дендроклиматологические исследования, основанные на TRW в

регион предоставил ценную информацию об исторических изменениях климата, подчеркнув значительные корреляции между летними температурами и ростом деревьев (Briffa et al., 2013; Kukarskih et al., 2018; Pellizzari et al., 2017; Shyatov, 1986), особенно на границе леса (Gurskaya et al., 2012; Kukarskih et al., 2018; Vaganov et al., 1996), и связав сдвиги растительности вверх с увеличением зимних осадков (Devi et al., 2020; Hagedorn et al., 2014). Учитывая, что данные о плотности и интенсивности синего цвета из аналогичных сред, как правило, демонстрируют сильные температурные сигналы, мы предположили, что LWBI и DBI будут сильно и положительно реагировать на летние температуры, подобно MXD. Мы ожидаем более сильные сигналы на Полярном Урале из-за его самого северного расположения и более низких температур, подчеркивая роль специфических для данного участка условий окружающей среды как движущих факторов различных климатических реакций. Затем мы обсуждаем релевантность LWBI и DBI как альтернативных температурных прокси в регионе.

2. Методы

2.1 Область исследования и дизайн выборки

Летом 2021 года были отобраны образцы шестидесяти разновозрастных деревьев сибирской лиственницы на участках верхней границы леса на Полярном Урале (далее ПУ; 66° 54' с.ш., 65° 45' в.д.; 125 м над уровнем моря) и Северном Урале (далее НУ; 59° 37' с.ш., 59° 15' в.д.; 750 м над уровнем моря; рис. 1а). Кernels древесины извлекались на высоте груди с помощью 5-миллиметрового сверла.

Среднегодовая температура и общее годовое количество осадков варьировались от 5,8 °C до 0,2 °C и от 450 мм до 850 мм в ПУ и НУ соответственно в период 1966–2020 гг. (рис. 1b). Среднегодовая температура увеличивалась со скоростью 0,55 °C и 0,24 °C за десятилетие в ПУ и НУ соответственно в течение того же периода (рис. 1c). Летняя температура (июнь–август) показала более высокие темпы потепления, 0,61 °C и 0,34 °C за десятилетие в ПУ и НУ. Напротив, осадки не показали какой-либо значительной тенденции. Метеорологические данные были получены из

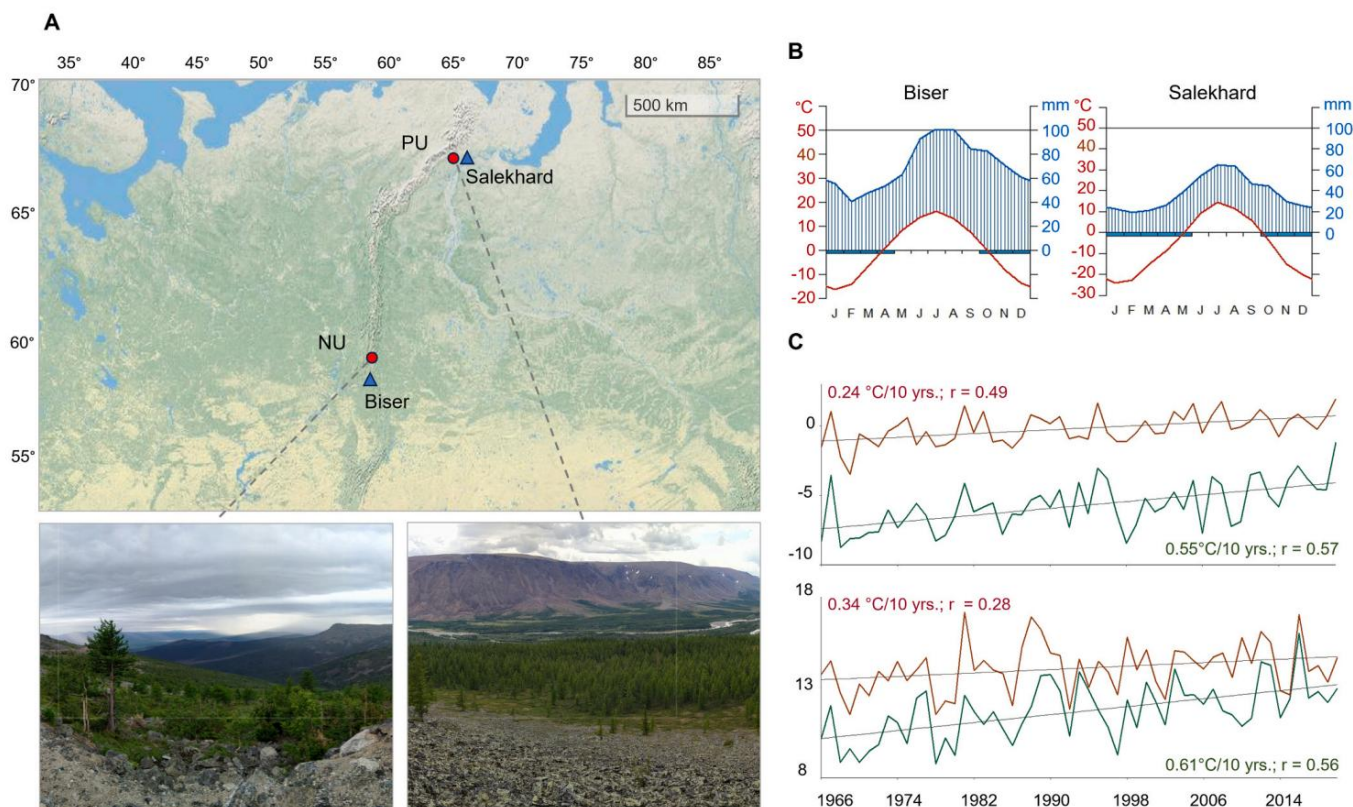


Рис. 1. Места и территория исследований. (А) Расположение мест отбора проб на Полярном Урале (ПУ) и Северном Урале (НУ) отмечено красным цветом, а близлежащие климатические станции в Салехарде и Бисере — синим. (В) Климатические диаграммы Бисера и Салехарда за период 1966–2020 гг. (С) Годовая (верхняя панель) и июнь–августовская (нижняя панель) температуры за период 1966–2020 гг. в Бисере (красный) и Салехарде (зеленый).

<https://www.meteo.ru> от ближайших метеостанций к каждому месту отбора проб: станция Салехард (66° 53' с.ш., 66° 53' в.д.; 15 м над уровнем моря), расположенная примерно в 50 км к западу от места ПУ, и станция Бисер (58° 51' с.ш. - 58° 87' в.д., 464 м над уровнем моря), расположенная в 86 км к северу от места НУ.

2.2 Параметры годовых колец и хронология развития

Смола и органические вещества удаляли из отобранных кернов с помощью этанола (96%) в течение 72 часов (Cerrato et al., 2023) в аппарате Сокслета. Такой подход снижает контраст между сердцевинной и заболонью (Rydval et al., 2014). Затем образцы кернов погружали в воду при температуре 80 °С на 48 часов, чтобы обеспечить извлечение оставшихся растворимых веществ. После этого керны высушивали на воздухе, приклеивали к деревянным подставкам и полировали наждачной бумагой с зернистостью до 1200. Отполированные керны сканировали с разрешением 3200 точек на дюйм с помощью планшетного сканера Epson Perfection V800 (Epson, Япония), откалиброванного с помощью цветовой карты IT8Calibration Target (Fujii) и сопряженного с программным обеспечением Silverfast SE (LaserSoft Imaging, США). Сканер был накрыт темным ящиком для минимизации внешних световых помех (Rydval et al., 2014). Измерения TRW, ширины ранней древесины (EWW), ширины поздней древесины (LWW) и BI выполнялись с использованием Coorecorder версии 9.3 (Cybis Elektronik & Data AB, Швеция). DBI рассчитывался путем вычитания интенсивности синего цвета ранней древесины (EWWI) из интенсивности синего цвета поздней древесины (Bjorklund et al., 2014). Серии TRW были визуально перекрестно датированы, а перекрестное датирование статистически подтверждено с помощью COFESHA (Grissino-Mayer, 2001). Из-за проблем с изменением цвета древесины параметры LWBI и DBI были измерены только у 23 и 22 деревьев в ПУ и НУ соответственно.

Все серии измерений были стандартизированы с использованием кубического сглаживающего сплайна с частотной характеристикой 50% на длине волны 2/3 длины серии в пакете «dplR» (Bunn, 2008) в среде R (R Core Team, 2022). Ряды TRW, EWW и LWW были отфильтрованы с использованием авторегрессионного моделирования для удаления автокорреляции и создания остаточных хронологий (Cook и Kairiukstis, 1990). Стандартизированные серии были объединены с использованием надежного двуххвостового среднего для создания стандартизированной индексной хронологии. Скорректированный индекс поздней древесины (LWadj) был получен путем регрессии остаточных хронологий EWW и LWW для удаления влияния ранней древесины (Meko и Baisan, 2001). Полученные средние хронологии оценивались с использованием выраженного популяционного сигнала (EPS), средней чувствительности (msx), средней межсерийной корреляции (rbt) и отношения сигнал/шум (SNR) (Wigley et al., 1984).

Для сравнения ранее полученные измерения MXD (34 и 22 дерева L. sibirica с Полярного и Северного Урала соответственно) использовались для сравнения и сопоставления климатических сигналов в LWBI и DBI. MXD измерялся в соответствии со стандартным протоколом (Schweingruber and Briffa, 1996), а ряды были детрендрованы с использованием 66% сплайнов в ARSTAN (Cook and Holmes, 1999) вместе с адаптивным степенным преобразованием (Cook and Peters, 1997), примененным до удаления тренда плотности.

2.3 Оценки климатических сигналов

Для оценки зависимости измеренных параметров от климатических факторов использовались корреляции Пирсона. Таким образом, стандартные хронологии TRW, EWW, LWadj, LWBI, DBI и MXD были коррелированы с ежемесячными средними значениями температуры, суммами осадков и стандартизированным индексом осадков-испарения (SPEI, Vicente-Serrano et al., 2010) в различных временных масштабах (1–14 месяцев). Кроме того, для оценки различий в климатических сигналах, зафиксированных в хронологиях измеренных параметров, остаточные хронологии TRW, EWW, LWadj, LWBI и DBI также были коррелированы с исключенными трендовыми данными о температуре и осадках. Корреляции проводились с сентября предыдущего года по сентябрь текущего года. Также оценивался агрегированный эффект климатических параметров для последовательных месяцев с наивысшими корреляциями в текущем вегетационном году (т. е. июнь-июль и июль-август). Для оценки стационарности климатических сигналов были выполнены 25-летние скользящие корреляции в пакете «Treeclim» (Biondi and Waikul, 2004) в среде R. Корреляции для TRW, LWBI и

DBI рассчитывались для периода 1966–2020 гг., тогда как MXD анализировался для периода 1966–2001 гг. из-за длительности существующих хронологий. Ежемесячные климатические данные были получены из Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды Российской Федерации (<https://www.meteo.ru>) и данные SPEI от Испанского национального исследовательского совета (CSIC; <https://spei.csic.es/index.html>). Поля пространственной корреляции были рассчитаны в KNMI Climate Explorer (<https://climexp.knmi.nl/>) с использованием сетки температур суши 0,5×0,5 CRU TS 4.06.

3. Результаты

3.1. Измерения роста и плотности деревьев

Хронологии TRW, LWBI и DBI охватывают 210 лет (1811–2020) на обоих участках. Хронологии MXD, основанные на различных наборах образцов, охватывают периоды 1641–2001 (ПУ) и 1816–2003 (НУ) со средней длиной серии 361±105 и 188±34 соответственно. Значения TRW варьируются от 0,59±0,43 мм на ПУ до 0,99±0,69 мм на НУ. Остаточная хронология TRW (рис. S1, необработанные серии на рис. S2) показывают более высокую среднюю чувствительность в НУ, чем в ПУ. Однако межсерийная корреляция и отношение сигнал/шум выше в ПУ (таблица 1). Значения rbt варьируются от 0,65 до 0,68 для TRW, 0,36–0,56 для параметров интенсивности синего и 0,64–0,65 для MXD. Хронологии TRW имеют более высокое отношение сигнал/шум (SNR). Средняя чувствительность (msx) для TRW также значительно выше, чем для параметров плотности, что указывает на более низкую изменчивость измерений плотности по сравнению с параметрами радиального роста. Выраженный популяционный сигнал (EPS) выше 0,9 для всех хронологий, что подтверждает надежность хронологий в течение периода исследования.

Корреляции Пирсона между сериями показывают самые сильные значимые корреляции между TRW и EWW (r = 0,99, 0,98; P < 0,001, в ПУ и НУ соответственно), TRW и DBI (r = 0,72, 0,64; P < 0,001, в ПУ и НУ соответственно), LWBI и DBI (r = 0,87, 0,91; P < 0,001, в ПУ и НУ соответственно) и MXD с параметрами LWBI и DBI (до r = 0,78; P < 0,001, для MXD и DBI в ПУ) (таблица S1).

3.2. Климатические сигналы, зависящие от параметров

Летние температуры положительно влияют на параметры, полученные с помощью TRW и BI в ПУ и НУ в период 1966–2020 гг., и на MXD в более короткий период 1966–2001 гг. (рис. 2). В хронологиях, разработанных с использованием различных методов удаления тренда (таблицы S3 и S4), нет существенных изменений во времени и интенсивности климатического сигнала. Поэтому представлены только результаты для стандартных хронологий. В ПУ на TRW и EWW в основном влияют температуры июня (r = 0,51 и 0,50 соответственно; P < 0,001), а на LWadj — температуры июля (r = 0,44; P <

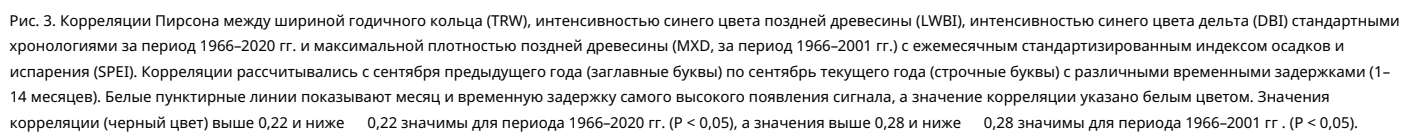
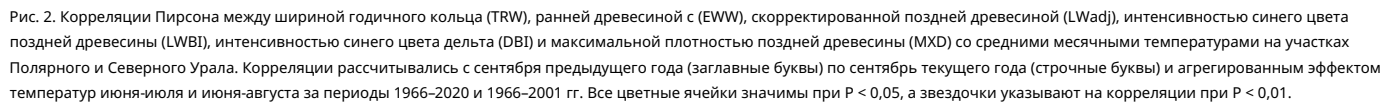
0,001). Реакция усиливается с агрегированными данными за июнь-июль

Таблица

1. Характеристики хронологий TRW, LWBI и DBI Larix sibirica за период 1966–2020 гг. и MXD за период 1966–2001 гг.

	Параметр	msx	rbt	EPS	SNR
Полярный Урал	TPB	0,45	0,68	0,98	54,4
	EWW	0,49	0,68	0,98	54,3
	LWadj	0,43	0,57	0,97	34,5
	LWBI	0,14	0,36	0,93	13,8
	ДБИ	0,25	0,42	0,95	17,9
	MXD	0,15	0,64	0,98	24,5
Северный Урал	TPB	0,54	0,66	0,98	44,3
	EWW	0,58	0,66	0,98	44,3
	LWadj	0,56	0,62	0,97	37,4
	LWBI	0,19	0,56	0,97	27,8
	ДБИ	0,30	0,54	0,96	25,5
	MXD	0,13	0,65	0,97	17,6

msx = средняя чувствительность, rbt = средняя межсерийная корреляция, EPS = выраженный популяционный сигнал, SNR = отношение сигнал/шум.



температуры ($r = 0,63, 0,61$ и $0,45$ для TRW, EWW и LWadj соответственно; $P < 0,001$). Для LWBI и DBI максимальный сигнал происходит в июле ($r = 0,57$ и $0,62$ соответственно; $P < 0,001$), с дальнейшим увеличением силы сигнала для температур июня-июля ($r = 0,64$ и $0,68$ соответственно; $P < 0,001$). MXD показывает более сильные сигналы с июня по август, достигая пика в июне и августе ($r = 0,68$ и $0,64$ соответственно; $P < 0,001$). Корреляции со средними сезонными температурами в июне-июле и июне-августе еще выше ($r = 0,77$ и $0,78$ соответственно; $P < 0,001$).

В NU температура влияет на параметры в начале вегетационного периода, с незначительной, но положительной реакцией на майские температуры. Температура июня значительно влияет на большинство параметров годовичных колец ($r = 0,70, 0,69, 0,45$ и $0,58$ для TRW, EWW, LWBI и DBI соответственно; $P < 0,001$). LWBI и DBI также значительно коррелируют с температурами мая ($r = 0,37$ и $0,33$ соответственно; $P < 0,05$), а LWadj реагирует на температуры августа ($r = 0,40$; $P < 0,05$). MXD показывает более надежные и продолжительные температурные сигналы, особенно с мая по август, достигая пика в июне и июле, $r = 0,71$ и $0,55$ соответственно ($P < 0,001$). Реакция LWBI, DBI и MXD на агрегированные температуры июня-июля также увеличивается ($r = 0,47, 0,64$ и $0,79$ соответственно; $P < 0,001$). Осадки оказывают значительное, но незначительное ($P < 0,05$) отрицательное воздействие на обоих участках, в основном поздней весной и серединой лета (рис. S3).

MXD показывает более сильные положительные отклики на летние температуры, чем LWBI и DBI за общий период 1966–2001 гг. (рис. 2). Сила сигнала усиливается при рассмотрении агрегированного эффекта температуры из последовательных месяцев (июнь-июль и июль-август) на обоих участках. В PU максимальные сигналы LWBI и DBI происходят в июле ($r = 0,65$ и $0,70$ соответственно; $P < 0,001$), тогда как максимальный сигнал MXD реагирует на агрегированные температуры июня-августа ($r = 0,78$; $P < 0,001$). В NU максимальные сигналы LWBI и DBI также наблюдаются в июле, но с меньшей интенсивностью сигнала по сравнению с PU ($r = 0,48$; $P < 0,01$ и $0,60$ соответственно), в то время как MXD коррелирует с наибольшими агрегированными температурами июня-июля ($r = 0,78$; $P < 0,001$). Июльские осадки отрицательно влияют на все параметры на обоих участках, с более сильными сигналами в NU (рис. S3).

Все параметры показывают значимые отрицательные корреляции с SPEI на обоих участках (рис. 3). В PU самые высокие значения корреляции обнаружены в июле, причем LWBI и MXD показывают самые сильные отрицательные корреляции

($r = 0,58$; $P < 0,001$) с 3-месячным отставанием для обоих параметров, за которым следует DBI ($r = 0,53$; $P < 0,001$) с 5-месячным отставанием, в то время как TRW демонстрирует самую слабую корреляцию ($r = 0,35$; $P < 0,01$). В NU MXD показывает самую сильную отрицательную корреляцию ($r = 0,69$; $P < 0,001$) в августе с 5-месячным отставанием, в то время как LWBI показывает самую низкую корреляцию ($r = 0,46$; $P < 0,001$) в июле с 3-месячным лагом. TRW и DBI имитируют интенсивность ответа ($r = 0,56$; $P < 0,001$), происходящего в июне (2-месячный лаг) и июле (3-месячный лаг) соответственно. При сравнении между сайтами хронологии TRW, DBI и MXD показывают более низкие сигналы в PU, чем в NU, тогда как сигнал LWBI выше в PU, чем в NU. Ответы EWW и LWadj на SPEI (рис. S4) ниже в PU ($r = 0,36$ и $0,38$; $P < 0,01$, с 3- и 2-месячным лагом соответственно), чем в NU ($r = 0,51$ и $0,57$; $P < 0,001$, с 3- и 2-месячным лагом соответственно).

3.3 Временная и пространственная стабильность температурных сигналов

Текущие корреляции между стандартными хронологиями TRW, LWBI, DBI и MXD показывают сильные положительные корреляции с агрегированными температурами июня-июля и июня-августа на обоих участках, оставаясь значимыми ($P < 0,001$) в течение всего периода. MXD показывает самые высокие значения корреляции по сравнению с другими параметрами на обоих участках (рис. 4, см. рис. S5 для индивидуальных ежемесячных ответов). В PU LWBI, DBI и MXD демонстрируют более сильные температурные ответы, чем TRW. Хотя корреляции для всех параметров остаются значимыми, TRW расходится с LWBI и DBI, при этом его температурный сигнал начинает уменьшаться около 1996 (июнь-июль) и 1993 (июль-август). В NU реакция TRW сместилась с течением времени по сравнению с LWBI и DBI, показав более высокую реакцию на температуры июня-июля с 1993 по 2002 год, в то время как реакция LWBI и DBI на температуры июня-августа остаются выше, чем TRW в течение всего периода. LWBI и DBI показывают снижение реакции на температуру около 1991 года, особенно выраженное для температур июня-августа.

Поля пространственной корреляции подтверждают сильное влияние агрегированных температур июня-июля на TRW, LWBI, DBI и MXD, при этом хронологии PU достигают более сильных корреляций, чем хронологии NU (рис. 5). TRW и LWBI демонстрируют более низкие корреляции в PU и NU соответственно, в то время как MXD показывает самую сильную корреляцию по сравнению с другими параметрами в обоих местах за более короткий период 1966–2001 гг.

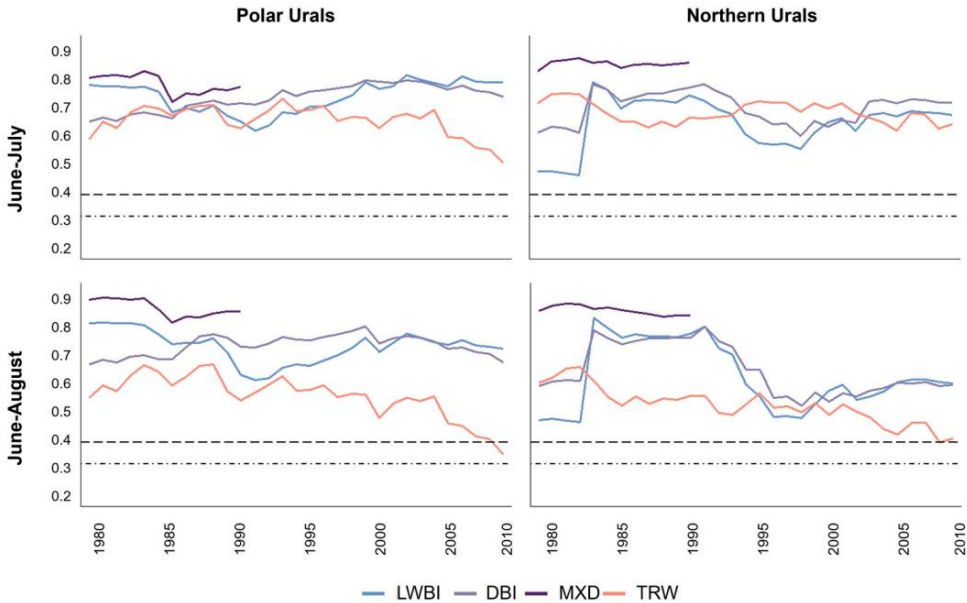


Рис. 4. 25-летние текущие корреляции ширины годичного кольца (TRW оранжевого цвета), интенсивности синего цвета поздней древесины (LWBI синего цвета), интенсивности дельта-синего цвета (DBI светло-фиолетового цвета) стандартных хронологий против агрегированных температур июня-июля и июня-августа за период 1966–2020 гг. и максимальной плотности поздней древесины (MXD темно-фиолетового цвета) за период 1966–2001 гг. Пунктирные и точечные линии представляют значимые корреляции при $P < 0,001$ и $P < 0,01$ соответственно за период 1966–2020 гг. Год относится к середине 25-летнего окна, показанного каждые пять лет.

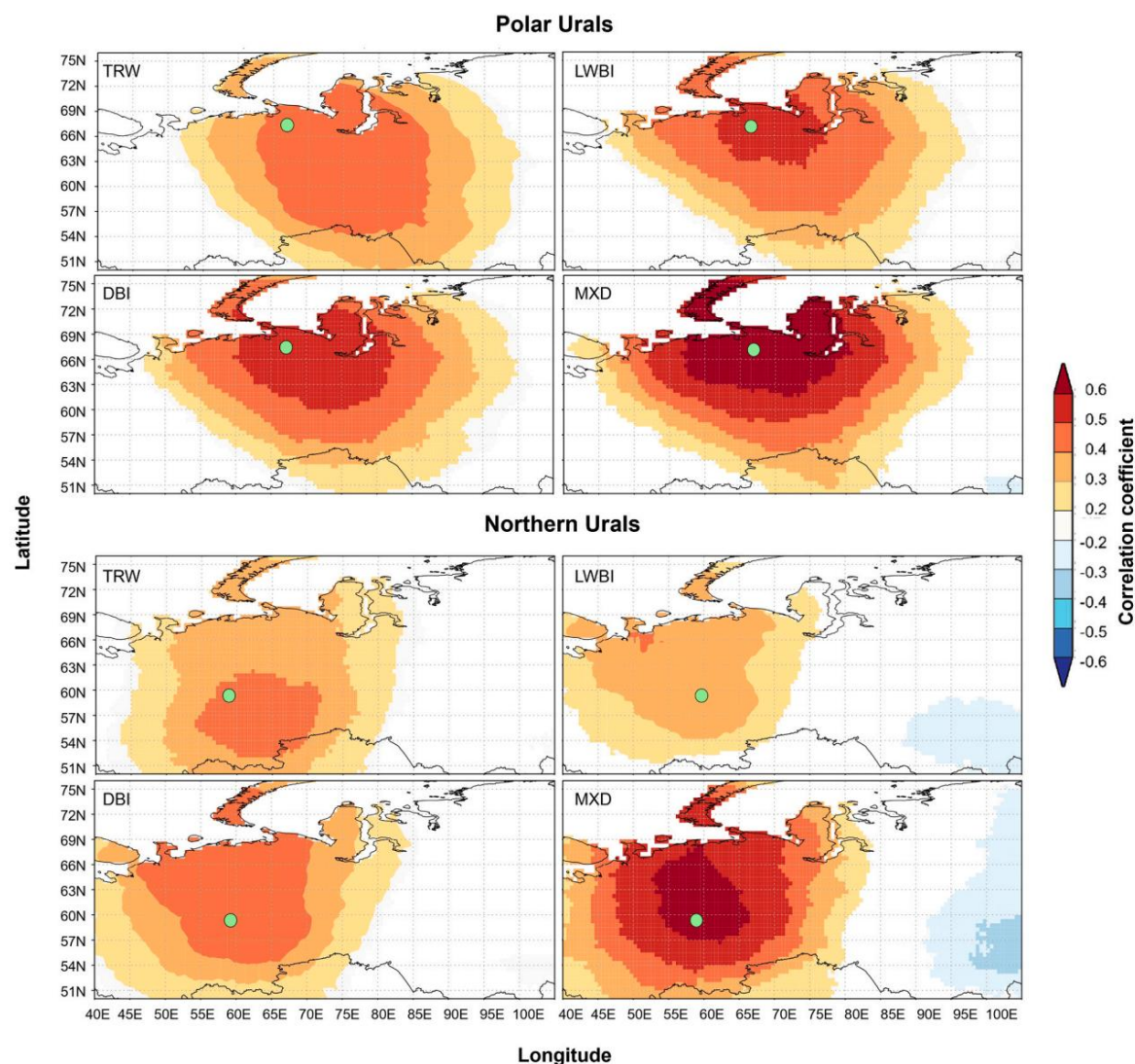


Рис. 5. Пространственные полевые корреляции между средними температурами июня-июля (CRU TS 4.06, 0.5°) и шириной годичных колец (TRW), интенсивностью синего цвета поздней древесины (LWBI), хронологией интенсивности синего цвета дельта (DBI) за период 1966–2020 гг. и хронологией максимальной плотности поздней древесины (MXD) за период 1966–2001 гг. Зеленые точки представляют местоположение участков отбора проб.

Географический охват самых высоких корреляций для DBI ($r > 0.5$; 60° с.ш.– 72° с.ш., 60° в.д.– 82° в.д.) и MXD ($r > 0.6$; 63° с.ш.– 72° с.ш., 56° в.д.– 80° в.д.) на ПУ отличается от такового для НУ DBI ($r > 0.4$; 4° с.ш.– 69° с.ш., 46° в.д.– 70° в.д.) и MXD ($r > 0.6$; 57° с.ш.– 69° с.ш., 54° в.д.– 65° в.д.).

4. Обсуждение

Наше исследование, основанное на параметрах интенсивности синего цвета на участках верхней границы леса в Уральских горах, впервые выявило сильную положительную реакцию хронологий LWBI и DBI сибирской лиственницы на летние температуры, подчеркивая их потенциал в качестве температурных прокси в регионе. Различия во времени и интенсивности температурных сигналов наблюдались между участками, с более ранними и более длительными сигналами на НУ, но в целом более слабыми и менее устойчивыми во времени по сравнению с самым северным участком, ПУ. Реакции LWBI и DBI были немного слабее, чем у MXD, особенно на самом южном участке, НУ.

Более ранние (майские) реакции TRW на температуру в НУ предполагают более мягкие условия роста по сравнению с ПУ, где более низкие температуры (таблица S2) задерживают начало роста деревьев до июня. Эти температурные различия, вероятно, влияют на характер роста деревьев и чувствительность к климату, подчеркивая приспособляемость *L. sibirica* к изменяющимся условиям, как и у других хвойных деревьев в центральной Сибири (Arzac et al., 2021a, 2021b;

Henttonen et al., 2014). Значимость условий, специфичных для конкретного участка, как движущего фактора изменчивости реакции климата (например, Khotcinskaja et al., 2024; Kirilyanov et al., 2013) также влияет на время появления максимальных умеренных сигналов BI и MXD между участками. Таким образом, ПУ в целом показывает более надежные сигналы LWBI и DBI, чем НУ, возможно, из-за более сильных ограничений, обусловленных экстремально низкими температурами (Gurskaya et al., 2012; Kukarskih et al., 2018; Shyatrov, 1986; Vaganov et al., 1996).

Временной фрейм, в котором MXD, LWBI и DBI кодируют сигналы температуры, различается. Сигналы MXD охватывают весь вегетационный период (Briffa et al., 1998; Büntgen et al., 2006; Kirilyanov et al., 2003), LWBI отражает изменения температуры в течение значительной части вегетационного периода (Rydval et al., 2014; Vyukhina and Gurskaya, 2022; Yue et al., 2023), а DBI охватывает более продолжительный период с более высокой интенсивностью сигнала по сравнению с LWBI (Björklund et al., 2021; Cerrato et al., 2023; Frank and Nicolussi, 2020; Fuentes et al., 2016; Seftigen et al., 2020; Wang et al., 2020; Wilson et al., 2014, 2017). Наши результаты частично соответствуют предыдущему утверждению, показывая сильную температурную реакцию DBI по сравнению с LWBI на обоих участках, но без различий во времени, которое они охватывают. Более того, наши результаты совпадают с предыдущими исследованиями в высокогорных районах Западной Монголии, где DBI у сибирской лиственницы показал высокую корреляцию с температурой июня-июля по сравнению с другими параметрами (Davi et al., 2021).

Наши результаты показывают надежную временную чувствительность параметров, полученных из MXD и BI, к температурам июня-июля на обоих участках. Чувствительность к температурам июня-августа остается стабильной в PU, тогда как в NU она снижается, возможно, из-за повышения летних температур. Чувствительность TRW к летним температурам расходится с LWBI и DBI в PU, что потенциально указывает на «проблему расхождения» в этом районе (D'Arrigo et al., 2008). Значимые корреляции демонстрируют широкий пространственный охват для LWBI, DBI и MXD в Уральских горах, аналогичный закономерностям, наблюдаемым в Канаде (Wang et al., 2020). Несмотря на высокую корреляцию между хронологиями, полученными из MXD и BI, согласованную с предыдущими исследованиями (например, Kaczka et al., 2018), температурные реакции выше для MXD, чем для LWBI и DBI. Эта разница может быть вызвана смещениями из-за более низкого разрешения измерений BI по сравнению с MXD (Bjorklund et al., 2020, Wang et al., 2020), усугубленными узостью колец в исследуемом регионе. К сожалению, ограниченная литература по измерениям BI для видов лиственницы и отсутствие прямых сравнений между параметрами, полученными из BI, и MXD для этого вида остаются заметными.

Незначительные отрицательные сигналы осадков на обоих участках, связанные с сильным откликом на SPEI (рис. 3), указывают на отсутствие ограничения воды в исследуемом регионе, в отличие от южных Уральских гор (Агафонов и др., 2021; Хоцинская и др., 2024; Табакова и др., 2020) и других регионов юга Сибири (Арзак и др., 2021б; Бабушкина и др., 2017; Табакова и др., 2020). Напротив, избыточная влажность почвы может отрицательно влиять на рост деревьев, о чем свидетельствует отрицательный отклик TRW на майские осадки на обоих участках (рис. S3). Теплые майские температуры могут привести к раннему таянию снега (Кирдянов и др., 2003; Ваганов и др., 1999), что обеспечивает дополнительную воду для роста, а также потенциальный доступ к воде из тающей вечной мерзлоты (Кирдянов и др., 2024; Заурер и др., 2016; Сугимото и др., 2002). В то же время, увеличение количества осадков также может привести к заболачиванию территорий вечной мерзлоты (Гурская и др., 2012).

Тем не менее, сильные отрицательные корреляции с SPEI могут быть связаны с коллинеарностью с месячными температурами, о чем свидетельствуют значительные отрицательные корреляции между SPEI и летними температурами (таблица S5).

Несмотря на потенциал LWBI и DBI в качестве температурных прокси в средах с ограниченной температурой, таких как Северный и Полярный Урал, текущая стандартная методология BI имеет ограничения. Реакция MXD и, следовательно, параметров, полученных с помощью BI, определяется размером клеток поздней древесины и размерами клеточных стенок (Bjorklund et al., 2021; Силкин и Кирдянов, 2003; Силкин и др., 2022), которые формируются в определенном температурном диапазоне у лиственницы сибирской (Ваганов и др., 1996). В условиях ограниченной температурой границы леса, где вегетационный период чрезвычайно короткий (Брюханова и др., 2013; Ринне и др., 2015), холодные периоды могут влиять на параметры клеток (Ваганов и др., 1985; 1999), что приводит к образованию узких колец, поздней древесины с одним рядом клеток или появлению «синих» и «светлых» колец (Бюнтген и др., 2022; Кривелларо и Бюнтген, 2020; Филион и др., 1986; Пьерматтей и др., 2015). Эти условия создают проблемы для измерений BI из-за ограничений разрешения обычно используемых планшетных сканеров. Кроме того, виды с проблемами изменения цвета, такие как сибирская лиственница, могут демонстрировать различия в контрастности между ядром и заболонью даже после экстракции смолы, что влияет на силу сигнала параметров BI или требует исключения собранного материала. Поэтому для регистрации высокочастотных вариаций и минимизации ограничений планшетных сканирующих систем необходимы дальнейшее развитие методологий BI и новые подходы, основанные на микроскопии высокого разрешения (Силкин и др., 2022; Рыдвал и др., 2024).

5. Заключение

Результаты этого исследования подтверждают использование интенсивности синего цвета поздней древесины и интенсивности дельта-синего цвета в качестве температурных прокси в условиях ограниченной температуры северной и верхней границы леса вдоль хребта Уральских гор. Подробный дендроклиматический анализ показывает, что новая интенсивность синего цвета и классические данные MXD с Северного и Полярного Урала тесно связаны с колебаниями температуры и способствуют нашему

понимание долгосрочных климатических изменений. Поскольку методология интенсивности синего цвета намного дешевле, чем основанная на рентгеновском MXD, она представляет собой ценную альтернативу этому устоявшемуся климатическому прокси. Для дальнейшего изучения умения реконструировать низкочастотную изменчивость температуры в регионе необходимы будущие исследования, охватывающие более широкий спектр климатических параметров и видов деревьев, а также комбинированные наборы данных LWBI живых и мертвых деревьев.

Заявление об авторском вкладе CRediT

Alberto Arzac: Написание — оригинальный черновик, Методология, Получение финансирования, Курирование данных, Концептуализация. Vladimir Kukarskih: Написание — рецензирование и редактирование, Методология, Курирование данных. Viktoria Agarova: Написание — оригинальный черновик, Методология, Формальный анализ, Курирование данных. Alexander Kirdyanov: Написание — рецензирование и редактирование, Концептуализация. Ulf Büntgen: Написание — рецензирование и редактирование, Концептуализация. Jan Esper: Написание — рецензирование и редактирование, Администрирование про

Декларация о конфликте интересов

Авторы заявляют о следующих финансовых интересах/личных отношениях, которые могут рассматриваться как потенциальные конкурирующие интересы: Альберто Арзак сообщает, что финансовая поддержка была предоставлена Министерством науки и высшего образования Российской Федерации. Владимир Кукарских сообщает, что финансовая поддержка была предоставлена Программой фундаментальных исследований Института экологии растений и животных. Ян Эспер сообщает, что финансовая поддержка была предоставлена Европейским исследовательским советом. Если есть другие авторы, они заявляют, что у них нет известных конкурирующих финансовых интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в этой статье.

Доступность данных

Данные будут предоставлены по запросу.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации [ФСР3-2020-0014]. В. УК финансировался Программой фундаментальных исследований Института экологии растений и животных Уральского отделения Российской академии наук [122021000093-6]. UB и JE финансировались проектом ERC MONOSTAR [AdG 882727]. Мы благодарим Н. Деви и М. Бубнова за их поддержку в этой области.

Приложение А. Вспомогательная информация

Дополнительные данные, связанные с этой статьей, можно найти в онлайн-версии по адресу doi:10.1016/j.dendro.2024.126267.

Ссылки

Агафонов Л.И., Гурская М.А., Кукарских В.В., Бубнов М.О., Деви Н.М., Галимова А. А., 2021. Островные сосновые леса Южного Урала и ленточные сосновые леса Алтая как объекты дендроклиматических исследований. Рос. ж. эколог. 52, 349–357. <https://doi.org/10.1134/S1067413621050039>.

Ахметзянов Л., Санчес-Гальеро Р., Гарсиа-Гонсалес И., Букас А., Домингес Дельмас М., Морен Ф., ден Оуден Х., Сасс-Клаассен У., 2020. Навстречу новый подход к дендропровенансу в Средиземноморье. Дендрохронология 60. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2020.125688>.

Анчукайтис, К. Дж., Д'Арриго, Р. Д., Андреу-Хейлс, Л., Фрэнк, Д., Верстеге, А., Кертис, А., Бабли, Б. М., Джейкоби, Г. К., Кук, Э. Р., 2013. Летние температуры, реконструированные по годичным кольцам деревьев на северо-западе Северной Америки за последние девять столетий. Дж. Клим. 26, 3001–3012. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00139.1>.

Анчукайтис, К. Дж., Уилсон, Р., Бриффа, К.Р., Бюнтген, У., Кук, Э.Р., Д'Арриго, Р., Дави, Н., Эспер, Дж., Франк, Д., Гуннарссон, Б.Е., Хегерл, Г., Хелама С., Клессе С., Крушич П. Дж., Линдхольм Х.В., Миглан В., Осборн Т. Дж., Чжан П., Ридвал М., Шнайдер Л., Шурер А., Уайлс Г., Зорита Э., 2017. Летние температуры в Северном полушарии последнего тысячелетия по годичным кольцам: Часть II, реконструкции с пространственным разрешением. Кват. наук. Откр. 163, 1–22. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2017.02.020>.

Арзак А., Табакова М., Хотцинская К., Котенева А., Кирдянов А., Олано Дж., 2021б.
Связь роста деревьев и внутригодовых колебаний плотности с климатом угнетенных и доминирующих деревьев *Pinus sylvestris* L. в лесостепи Южной Сибири.
Дендрохронология 67. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2021.125842>.

Арзак А., Тычков, И., Рубцов, А., Табакова, МА, Брежнев, Р., Кошурникова, Н., Кнорре, А., Бюнтген У., 2021а. Фенологические сдвиги компенсируют вызванный потеплением стресс засухи у южносибирских обыкновенных сосен. *Eur. J. For. Res.* 140, 1487–1498. <https://doi.org/10.1007/s10342-021-01412-w>.

Бабст, Ф., Райт, У. Э., Сейнер, П., Уэллс, Л., Бельмечери, С., Монсон, Р. К., 2016. Параметры интенсивности синего цвета, полученные из колец сосны желтой, характеризуют внутригодовые колебания плотности и выявляют сезонно расходящиеся ограничения по воде. *Деревья* 30, 1403–1415. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2020.125688>.

Бабушшина, Е., Белокопытова, Л., Грачев, А., Мeko, Д., Ваганов, Е., 2017. Изменение гидрологического режима бессточного бассейна Беле-Шира на юге Сибири и его отражение в радиальном приросте *Larix sibirica*. *Reg. Environ. Chang.* 17, 1725–1737. <https://doi.org/10.1007/s10113-017-1137-1>.

Барченков, А., Рубцов, А., Сафронова, И., Астапенко, С., Табакова, К., Богданова, К., Ануев, Э., Арзак, А., 2023. Особенности отмирания сосны обыкновенной вследствие нашествия короедов в симбиозе с одиозомыми грибами в лесостепи Средней Сибири. *Леса* 14 (7), 1301. <https://doi.org/10.3390/f14071301>.

Бионди, Ф., Вайкул, К., 2004. DENDROCLIM2002: программа на C++ для статистической калибровки климатических сигналов в хронологиях колец деревьев. *Comput. Geosci.* 30, 303–311. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2003.11.004>.

Бьёрклунд Дж., фон Аркс Г., Нивергельт Д., Уилсон Р., Ван ден Бульке Дж., Гюнтер Б., Лоадер Нью-Джерси, Ридвал М., Фонти П., Шарнвебер, Т., Андреу-Хейлс Л., Бюнтген У., Д'Арриго Р., Дави Н., Де Миль, Т., Эспер, Дж., Гартнер, Х., Гири, Дж., Гуннарссон, Б.Е., Харлт, К., Эвиа, А., Сонг, Х., Янечка, К., Качка, Р.Дж., Кирдянов, А.В., Кохбек М., Лю Ю., Мeko М., Мундо И., Николусси К., Олкерс Р., Пихлер Т., С'Анчес-Сальеро, Р., Шнайдер, Л., Швайнгрубер, Ф., Тимонен, М., Труз, В., Ван Акер, Дж., Верстеge, А., Вильяльба, Р., Уилмингтон, М., Франк, Д., 2019. Научные достоинства и аналитические задачи денситометрии годовичных колец. *Преподобный Геофиз.* 57, 1224–1264. <https://doi.org/10.1029/2019RG000642>.

Бьорклунд, Дж., Фонти, М.В., Фонти, П., Ван ден Булке, Дж., фон Аркс, Г., 2021. Размеры клеточной стенки имеют решающее значение: состав клеточной стенки не имеет значения для температурного сигнала плотности поздней древесины/интенсивности синего цвета у сосны обыкновенной. *Dendrochronologia* 65. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2020.125785>.

Бьорклунд, JA, Гуннарссон, BE, Сефтиген, К., Эспер, J., Линдехольм, NW, 2014. Интенсивность и плотность синего цвета в кольцах деревьев северной Фенноскандии, изучение потенциала улучшения реконструкций летних температур с использованием информации о ранней древесине. *Климат* 10, 877–885. <https://doi.org/10.5194/cp-10-877-2014>.

Бьорклунд, Дж., Гуннарссон, Б. Э., Сефтиген, К., Чжан, П., Линдехольм, Х. В., 2015. Использование скорректированных данных интенсивности синего для получения высококачественной информации о летней температуре: исследование случая из Центральной Скандинавии. *Голоцен* 25, 547–556. <https://doi.org/10.1177/0959683614562434>.

Бьорклунд, Дж., Сефтиген, К., Фонти, П., Нивергельт, Д., фон Аркс, Г., 2020. Дендроклиматический потенциал дендроанатомии чувствительной к температуре сосны обыкновенной. *Дендрохронология* 60. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2020.125673>.

Бьёрклунд Дж., Сефтиген К., Качка Р.Дж., Ридвал М., Уилсон Р., 2024. Стандартная терминология для интенсивности синего цвета (BI). *Дендрохронология* 85. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2024.126200>.

Бриффа, К. Р., Мелвин, Т. М., Осборн, Т., Хантемиров, Р. М., Кирдянов, А. В., Мазепа, В. С., Шиятов, С. Г., Эспер, Дж., 2013. Переоценка доказательств роста деревьев и предполагаемого изменения температуры в течение нашей эры на Ямале, северо-запад Сибири. *Sci. Rev.* 72, 83–107. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2013.04.008>.

Briffa, KR, Schweingruber, FH, Jones, PD, Osborn, TJ, Harris, IC, Shiyats, SG, Vaganov, EA, Grudd, H., 1998. Деревья рассказывают о климате прошлого: но говорят ли они сегодня менее ясно? *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.* 353, 65–73. <https://doi.org/10.1098/rstb.1998.0191>.

Брюханова М.В., Кирдянов А.В., Прогушкин А.С., Силкин П.П., 2013. Специфика Особенности ксилогенеза у лиственницы даурской *Larix gmelinii* (Rupr.) Rupr., произрастающей на вечномёрзлых почвах Средней Сибири. *Расс. Дж. Экол.* 44. <https://doi.org/10.1134/S1067413613050044>.

Банн, А.Г., 2008. Библиотека программ дендрохронологии в R (dplR). *Дендрохронология* 26, 115–124. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2008.01.002>.

Бюнтген У., Аллен К., Анчукайтис К., Арсено Д., Буше Э., Брёнинг А., Чаттерджи С., Керубини П., Чуракова (Сидорова) О.В., Корона, К., Дженааретти, Ф., Гриссингер, Дж., Гийе, С., Гю, Ж., Гуннарссон, Б., Хелама С., Хохройтер П., Хьюз М.К., Хайберс П., Кирдянов А.В., Крушич П.Дж., Людешер Дж., Мейер У.Дж.-Х., Миглан В.С., Николусси К., Опленгеймер К., Рейниг Ф., Зальцер М.В., Сефтиген К., Стайн А.Р., Стоффель, М., Джордж, С.Ст, Техедор, Э., Тревино, А., Труз, В., Ван, Дж., Уилсон, Р., Ян, Б., Сюй, Г., Эспер, Дж., 2021. Влияние принятия решений в дереве Реконструкции климата на основе колец. *Nat. Commun.* 12, 3411. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-23627-6>.

Бюнтген У., Кривелларо А., Арсено Д., Бэйли М., Барклай Д., Бернабеи М., Бонтати Дж., Босвейк Г., Браун Д., Кристи Д.А., Чуракова О.В., Кук Э.Р., Д'Арриго Р., Дави Н., Эспер Дж., Фонти П., Гривз, Г., Хантемиров Р.М., Хьюз М. К., Kirdyanov, AV, Krusic, PJ, Le Quesne, C., Ljungqvist, FC, McCormick, M., Mygland, VS, Nicolussi, K., Oppenheimer, C., Palmer, J., Qin, C., Reinig, F., Salzer, M., Stoffel, M., Torbenson, M., Trnka, M., Villalba, R., Wiesenberg, N., Wiles, G., Yang, B., Piermattei, A., 2022. Глобальная перспектива анатомии древесины на начало позднеледникового периода (LALIA) в середине VI в. н. э. *Sci. Bull.* 67 (22), 2336–2344. <https://doi.org/10.1016/j.scib.2022.10.019>.

Бюнтген У., Франк Д.К., Качка Р.Дж., Верстеge А., Звяич-Козица Т., Эспер Дж., 2007. Реакция роста на климат в многовидовой сети годовичных колец деревьев в Западных Карпатских Татрах, Польша и Словакия. *Tree Physiol.* 27, 689–702. <https://doi.org/10.1093/treephys/27.5.689>.

Бюнтген У., Франк, Д.К., Нивергельт, Д., Эспер, Дж., 2006. Летние колебания температуры в европейских Альпах, 755–2004 гг. н.э. *J. Clim.* 19, 5606–5623. <https://doi.org/10.1175/JCLI3917.1>.

Бюнтген У., Либхольд А., Нивергельт Д., Вермелингер Б., Рокес А., Рейниг Ф., Крушич, П. Дж., Пьерматтей, А., Эгли, С., Керубини, П., Эспер, Дж., 2020. Возвращение моли: переосмысление влияния климата на вспышки численности насекомых. *Oecologia* 192, 543–552. <https://doi.org/10.1007/s00442-019-04585-9>.

Cerrato, R., Salvatore, MC, Carrer, M., Brunetti, M., Baroni, C., 2023. Интенсивность синего цвета швейцарской сосны как показатель высокочастотной температуры в Альпах. *Eur. J. For. Res.* <https://doi.org/10.1007/s10342-023-01566-9>.

Керубини, П., Фонтана, Г., Риглинг, Д., Доббертин, М., Бранг, П., Иннес, Дж. Л., 2002. История жизни дерева до смерти: два грибковых корневых патогена по-разному влияют на рост годовичных колец дерева. *J. Ecol.* 839–850. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2745.2002.00715.x>.

Чаварелла А., Коттерилл Д., Стотт П., Кыо С., Филип С., ван Олденбург Г.Дж., Скалевар, А., Лоренц, П., Робин, Й., Отто, Ф., Хаузер, М., Сеневиратне, СИ, Ленер, Ф., Золина, О., 2021. Длительная сибирская жара 2020 года почти невозможна без влияния человека. *Климат*. Изменение 166, 9. <https://doi.org/10.1007/s10584-021-03052-w>.

Кук, Э., Холмс, Р., 1999. Развитие хронологии с помощью статистического анализа. *ПОЛЬЗОВАТЕЛИ РУКОВОДСТВО по программе ARSTAN*, Тусон, Аризона, США.

Кук Э.Р., Кайрюкстис Л., 1990. Методы дендрохронологии – применение в Науки об окружающей среде. *Springer, Нидерланды (Нидерланды)*.

Кук, Э. Р., Питерс, К., 1997. Расчет несмещенных индексов годовичных колец для изучения климатических и экологических изменений. *Голоцен* 7 (3), 361–370. <https://doi.org/10.1177/095968369700700314>.

Кривелларо, А., Бюнтген, У., 2020. Новые доказательства термически ограниченной лигнификации клеточной стенки растений. *Trends Plant Sci.* 25 (4), 322–324. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2020.01.011>.

Д'Арриго, Р., Уилсон, Р., Липерт, Б., Керубини, П., 2008. О «проблеме расхождения» в северных лесах: обзор данных годовичных колец и возможных причин. *Glob. Planet. Change*. Изменение 60. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2007.03.004>.

Davi, NK, Jacoby, GC, Wiles, GC, 2003. Изменчивость борельной годовичных колец для изучения климатических плотности поздней древесины и данных годовичных колец, регион горы Врангель. *Alsk.*

Кват. Рез. 60, 252–262. [https://doi.org/10.1016/s0033-5894\(03\)00115-7](https://doi.org/10.1016/s0033-5894(03)00115-7).

Davi, NK, Rao, MP, Wilson, R., Andreu-Hayles, L., Oelkers, R., D'Arrigo, R., Nachin, B., Buckley, B., Pederson, N., Leland, C., Suran, B., 2021. Ускоренное недавнее потепление и изменчивость температуры за последние восемь столетий в Центрально-Азиатском Алтае по интенсивности синего цвета в кольцах деревьев. *Geophys. Res. Lett.* 48. <https://doi.org/10.1029/2021GL092933>.

Дави, Н., Хагедорн, Ф., Моисеев, П., Бугманн, Х., Шиятов, С., Мазепа, В., Риглинг, А., 2008. Расширение лесов и изменение форм роста сибирской лиственницы на границе леса Полярного Урала в течение 20 века. *Glob. Chang. Biol.* 14, 1581–1591. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01583.x>.

Дави, Н.М., Кукарских, В.В., Галимова, А., Мазепа, В.С., Григорьев, А.А., 2020. Проявления изменения климата в росте деревьев и продуктивности древостоев в экотоне верхней границы леса в горах Полярного Урала. *Для. Экосистем*. 7. <https://doi.org/10.1186/s40663-020-0216-9>.

Долгова, Е., 2016. Реконструкция температуры в июне-сентябре на Северном Кавказе на основе данных об интенсивности синего цвета. *Дендрохронология* 39, 17–23. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2016.03.002>.

Эспер, Й., Бюнтген, У., Франк, Д.К., Нивергельт, Д., Либхольд, А., 2007. 1200 лет Регулярные вспышки численности альпийских насекомых. *Proc. R. Soc. B* 274671–274679. <https://doi.org/10.1098/rspb.2006.0191>.

Эспер, Дж., Кук, Э.Р., Швайнгрубер, Ф.Х., 2002. Низкочастотные сигналы в длинных древесно-кольцевых хронологиях для реконструкции прошлой изменчивости температуры. *Science* 295, 2250–2253. <https://doi.org/10.1126/science.1066208>.

Эспер, Й., Дютхон, Э., Крушич, П., Тимонен, М., Бюнтген, У., 2014. Изменения летних температур в Северной Европе в течение нашей эры по данным комплексных данных о плотности годовичных колец деревьев. *J. Quat. Sci.* 29, 487–494. <https://doi.org/10.1002/jqs.2726>.

Эспер Дж., Франк Д., Бюнтген У., Верстеge А., Хантемиров Р., Кирдянов А.В., 2010. Тенденции и неопределенности в сибирских индикаторах потепления в 20 веке. *Глоб. Chang. Biol.* 16, 386–398. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.01913.x>.

Эспер Дж., Франк Д.К., Тимонен М., Зорита Э., Уилсон Р.Дж.С., Лютербахер Дж., Хольцкампер С., Фишер Н., Вагнер С., Нивергельт Д., Верстеge А., Бюнтген У., 2012. Орбитальное воздействие на данные годовичных колец. *Нат. Клим. Изменение* 2, 862–866. <https://doi.org/10.1038/nclimate1589>.

Эспер, Дж., Крушич, П.Дж., Люнγκвист, Ф.К., Лютербахер, Дж., Каррер, М., Кук, Э., Дави, Н.К., Харлт-Мейер, К., Кирдянов, А., Контер, О., Мыглан, В., Тимонен, М., Трейдте К., Труз В., Вильяльба Р., Янг Б., Бюнтген, У., 2016. Рейтинг температурных реконструкций прошлого тысячелетия на основе годовичных колец. *Кват. наук. Откр.* 145, 134–151. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2016.05.009>.

Эспер, Дж., Шнайдер, Л., Смердон, Дж. Э., Шоне, " БР, Бюнтген, У., 2015. Сигналы и память в данных о ширине и плотности годовичных колец. *Dendrochronologia* 35, 62–70. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2015.07.001>.

Эспер, Дж., Торбенсон, М., Бюнтген, У., 2024. Летом 2023 года тепло, не имеющее себе равных за последние 2000 лет. *Природа* 631. <https://doi.org/10.1038/s41586-024-07512-y>.

Филлон, Л., Пайетт, С., Готье, Л., Бутен, И., 1986. Светлые кольца у субарктических хвойных как дендрохронологический инструмент. (http://). *Quat. Res.* 26. [https://doi.org/10.1016/0033-5894\(86\)90111-0](https://doi.org/10.1016/0033-5894(86)90111-0).

Франк, Т., Николусси, К., 2020. Тестирование различных разграничений ранней/поздней древесины для установления данных интенсивности синего: исследование на основе образцов альпийской *Picea abies*. *Dendrochronologia* 64, 125775. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2020.125775>.

Фриттс, ХК, 1976. Реконструкция пространственных изменений климата. *Tree Rings Clim.* 434–505. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-268450-0.50014-8>.

Фуэнтес М., Бьорклунд Дж., Сефтиген К., Сало Р., Гуннарссон Б.Е., Линдехольм Х.В., Аравена, Дж. К., 2016. Сравнение ширины годичного кольца и интенсивности синего цвета.

и низкочастотные сигналы от *Pinus sylvestris* L. из Центральных и Северных Скандинавских гор. STR16/04, 38.

Гринвуд, С., Джапп, А.С., 2014. Последствия смещения линии леса для разнообразия и функционирования высокогорных экосистем. Арктика, Антарктида. Альп. Рез. 46, 829–840. <https://doi.org/10.1657/1938-4246-46.4.829>.

Гриссино-Майер, HD, 2001. Оценка точности перекрестного датирования: руководство и учебник для компьютерной программы COFECOA. Tree-ring Res. 57 (2), 205–221.

Груда, Х., 2008. Tometask – ширина и плотность годовичных колец деревьев 500–2004 гг. н.э.: испытание климатических чувствительность и новая 1500-летняя реконструкция лета в Северной Фенноскандии. Климат. Дин. 31, 843–857. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2018.02.002>.

Гурская, М., Халлингер, М., Сингх, Дж., Агафонов, Л., Вильминг, М., 2012. Реконструкция температуры в долине реки Обь на основе ширины колец трех видов хвойных деревьев. Дендрохронология 30, 302–309. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2012.04.002>.

Хагедорн, Ф., Шиятов, С.Г., Мазепа, В.С., Деви, Н.М., Григорьев, А.А., Бартыш, А.А., Фомин, В.В., Капралов, Д.С., Терентьев, М., Бугман, Х., Риглинг, А., Моисеев, П.А., 2014. Продвижения линии леса вдоль Уральского хребта – обусловлены улучшением зимних условий? Glob. Chang. Biol. 20, 3530–3543. <https://doi.org/10.1111/gcb.12613>.

Ханссон, А., Даргуш, П., Шульмейстер, Дж., 2021. Обзор современной миграции лесной границы, факторов, контролирующих ее, и последствий для хранения углерода. J. Mt. Sci. 18, 291–306. <https://doi.org/10.1007/s11629-020-6221-1>.

Хантемиров, Р.М., Корона, К., Гийе, С., Шиятов, С.Г., Стоффель, М., Осборн, Т.Дж., Мелвин Т.М., Горланова Л.А., Кукарских В.В., Сурков А.Я., фон Аркс Г., Фонти П., 2022. Современное сибирское потепление является беспрецедентным за последние семь тысячелетий. Нат. Коммун. 13, 1–8. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-32629-x>.

Хантемиров Р.М., Шиятов С.Г., Горланова Л.А., Кукарских В.В., Сурков А.Ю., Хамзин, ИР, Фонти, П., Вакер, Л., 2021. 8768-летняя древесно-кольцевая хронология Ямала как инструмент палеоэкологических реконструкций. Russ. J. Ecol. 52, 419–427. <https://doi.org/10.1134/S1067413621050088>.

Хантемиров, Р.М., Шиятов, С.Г., 2002. Непрерывно-многотысячелетняя ширина кольца хронология на Ямале, северо-запад Сибири. Голоцен 12, 717–726. <https://doi.org/10.1191/0959683602hls585rp>.

Харш, МА, Хьюм, П.Е., МакГлон, М.С., Дункан, Р.П., 2009. Продвигаются ли границы деревьев? Глобальный метаанализ реакции границы леса на потепление климата. Ecol. Lett. 12, 1040–1049. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2009.01355.x>.

Хитер, К. Дж., Харли, Г. Л., Максвелл, Дж. Т., Уилсон, Р. Дж., Абацоглу, Дж. Т., Рейбек, С. А., Рохнер, М. Л., Китченс, КА, 2021. Изменчивость летней температуры с 1730 г. н. э. в низких и средних широтах западной части Северной Америки по данным сети интенсивности синего кольца деревьев. Quat. Sci. Rev. 267. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2021.107064>.

Хенттонен, Х.М., Мякинен, Х., Хейсканен, Й., Пелтониеми, М., Лорен, А., Хордо, М., 2014. Реакция радиальной вариации прироста сосны обыкновенной на температуру, осадки и содержание почвенной влаги вдоль широтного градиента через Финляндию и Эстонию. Agric. For. Meteorol. 198, 294–308. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2019.125648>.

Межправительственная группа экспертов по изменению климата (МГЭИК) (ред.). 2023. Изменение климата 2023: сводный отчет. Вклад рабочих групп I, II и III в шестой оценочный доклад Межправительственной группы экспертов по изменению климата. Женева, Швейцария. <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>.

Цзян, Й., Бегович, К., Ногейра, Дж., Шурман, Дж., Свобода, М., Рыдвал, М., 2022. Влияние сигнатур возмущений на ширину годовичных колец деревьев и хронологическую структуру интенсивности синего цвета и климатические сигналы в ели норвежской в Карпатах. Сельское хозяйство. Метеорология. 327. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2022.109236>.

Kaczka, RJ, Sryt, B., Janecka, K., Beil, I., Bü ntgen, U., Scharnweber, T., Nievergelt, D., Wilmking, M., 2018. Различные методы измерения максимальной плотности поздней древесины и интенсивности синего цвета показывают схожие результаты. Dendrochronologia 49, 94–101. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2018.03.005>.

Хотчинская К.И., Арзак А., Кирдянов А.В., Табакова М., Олано Ж.М., 2024. Образование конститутивных смоляных ходов у *Pinus sylvestris* зависит от доступности воды и температуры на юге Сибири. Agric. For. Meteorol. 347. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2024.109913>.

Кирдянов А., Хьюз М., Ваганов Э., Швайнгрубер Ф., Силкин П., 2003. Значение ранней летней температуры и даты таяния снега для роста деревьев в Сибирской Субарктике. Деревья – Структурные функции. 17, 61–69. <https://doi.org/10.1007/s00468-002-0209-z>.

Кирдянов А.В., Крушич П.Я., Шишов В.В., Ваганов Е.А., Фертиков А.И., Мыглан В.С., Баринов В.В., Обзор Ж., Эспер Ю., Ильин В.А., Кнорре А.А., Корец М.А., Кукарских В.В., Машуков Д.А., Онучин А.А., Перматтей А., Пименов А.В., Прокушкин А.С., Рыжкова В.А., Шишикин А.С., Смит К.Т., Тайник А.В., Вильд М., Зорита Э., Бюнтген У., 2020. Экологические и концептуальные последствия загрязнения Арктики. Экол. Летт. 23 (12), 1827–1837. <https://doi.org/10.1111/ele.13611>.

Кирдянов, А.В., Прогушкин, А.С., Табакова, М.А., 2013. Годичный прирост лиственницы Гмелина в контрастных локальных условиях севера Средней Сибири. Дендрохронология 31. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2012.10.003>.

Кирдянов А.В., Заурер М., Арзак А., Кнорре А.А., Прокушкин А.С., Чуракова (Сидорова) О.В., Арозио, Т., Бебчук, Т., Зигвольф, Р., Бюнтген, У., 2024. Таяние вечной мерзлоты может смягчить вызванный потеплением стресс от засухи у деревьев boreальных лесов. Sci. Всего по окружающей среде. 912, 168858. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168858>.

Кирдянов, А.В., Ваганов, Е.А., Хьюз, М.К., 2007. Разделение климатического сигнала по данным о ширине годовичных колец и максимальной плотности поздней древесины. Деревья – Структурные функции. 21, 37–44. <https://doi.org/10.1007/s00468-006-0094-y>.

Корнер, К., 2021. Предел холодного диапазона деревьев. Trends Ecol. Evol. 36, 979–989. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2021.06.011>.

Корнер, К., 2012. Альпийские линии деревьев. Springer, Базель, стр. 220. <https://doi.org/10.1007/978-3-0348-0396-0>.

Корнер, К., Паульсен, Дж., 2004. Всемирное исследование температур на высоте над уровнем моря. J. Biogeogr. 31, 713–732. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2003.01043.x>.

Кукарских В.В., Деви Н.М., Моисеев П.А., Григорьев А.А., Бубнов М.О., 2018. Широтные и временные сдвиги в реакции радиального роста на климат лиственницы сибирской на Полярном Урале. J. Mt. Sci. 15, 722–729. <https://doi.org/10.1007/s11629-017-4755-7>.

Линдерхольм, Х. В., Бьорклунд, Дж. А., Сефтиген, К., Гуннарссон, Б. Э., Груда, Х., Чон, Дж. Х., Дробышев, И., Лю, Й., 2010. Дендроклиматология в Фенноскандии – от прошлых достижений к будущему потенциалу. Clim. 6, 93–114. <https://doi.org/10.5194/cp-6-93-2010>.

Макдональд, ГМ, Кременецкий, КВ, Бейлман, ДВ, 2008. Изменение климата и Зона лесной зоны северной России. Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci. 363, 2285–2299. <https://doi.org/10.1098/rstb.2007.2200>.

Мекко, Д.М., Байсан, Ч.Х., 2001. Пилотное исследование ширины поздней древесины хвойных как индикатора изменчивости летних осадков в североамериканском муссонном регионе. Int. J. Климатол. 21, 697–708. <https://doi.org/10.1002/joc.646>.

Мыглан В.С., Жарников З.Я., Сидорова М.О., Баринов В.В., Тайник А.В., 2018. Применение метода интенсивности синего цвета для датирования деревянных построек в Сибири. Археол. Этнол. Антропол. Евразия 46, 109–113. <https://doi.org/10.17746/1563-0102.2018.46.4.109-113>.

Оверленд, Дж. Э., Ванг, М., 2021. Сибирская волна тепла 2020 года. Int. J. Climatol. 41, E2341–E2346. <https://doi.org/10.1002/joc.6850>.

Паульсен, Дж., Корнер, К., 2014. Климатическая модель для прогнозирования потенциального положения линии леса по всему миру. Alp. Bot. 124, 1–12. <https://doi.org/10.1007/s00035-014-0124-0>.

Pellizzari, E., Camarero, JJ, Gazol, A., Granda, E., Sheti, R., Wilmking, M., Moiseev, P., Pividori, M., Carrer, M., 2017. Расхождение в росте кустарников и деревьев от полярных до средиземноморских биомов на европейском континенте. Glob. Chang. Biol. 23, 3169–3180. <https://doi.org/10.1111/gcb.13577>.

Piermattei, A., Crivellaro, A., Carrer, M., Urbinati, C., 2015. «Голубое кольцо»: анатомия и гипотеза формирования новой аномалии годовичных колец у хвойных. Деревья 29, 613–620. <https://doi.org/10.1007/s00468-014-1107-x>.

R Core Team, 2022. R: Язык и среда для статистических вычислений. Основа R для статистических вычислений. <https://www.r-project.org/>.

Рантанен М., Карпечко А.Ю., Липпонен А., Нордлинг К., Хиваринен О., Руостеный, К., Вихма, Т., Лааксонен, А., 2022. С 1979 года Арктика нагревается почти в четыре раза быстрее, чем весь земной шар. Commun. Earth Environ. 3. <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00498-3>.

Рид, Э., Уилсон, Р., 2020. Интенсивность дельта-синего в сравнении с максимальной плотностью: исследование случая с использованием *Pinus uncinata* в Пиренеях. Dendrochronologia 61. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2020.125706>.

Ринне К.Т., Заурер М., Кирдянов А.В., Брюханова М.В., Прокушкин А.С., Чуракова (Сидорова), О.В., Зигвольф, РТВ, 2015. Изучение реакции хвойных углеводов сибирской лиственницы на климат с использованием анализа δ13C и концентрации соединений. Plant Cell Environ. 38. <https://doi.org/10.1111/pce.12554>.

Ридваль М., Бьорклунд Дж., фон Аркс Г., Бегович К., Лекса М., Ногейра Дж., Шурман Дж. S., Jiang, Y., 2024. Сверхвысокоразрешающая визуализация в отраженном свете для дендрохронологии. Dendrochronologia 83. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2023.126160>.

Рыдвал, М., Дракенброд, Д., Анчукайтис, К. Дж., Уилсон, Р., 2015. Обнаружение и устранение тенденций нарушений в рядах годовичных колец деревьев для дендроклиматологии. Can. J. For. Res. 46, 387–401. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2015-0366>.

Рюдал, М., Ларссон, Л.А., МакГлинн, Л., Гуннарссон, Б.Е., Лоадер, Н.Дж., Янг, Г.Х.Ф., Уилсон, Р., 2014. Интенсивность синего цвета для дендроклиматологии: нужна ли нам синева? Эксперименты из Шотландии. Dendrochronologia 32, 191–204. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2014.04.003>.

Заурер, М., Кирдянов, А.В., Прокушкин, А.С., Ринне, К.Т., Зигвольф, РТВ, 2016. Влияние обратной климатическо-изотопной зависимости в почвенной воде на изотопный состав кислорода лиственницы Гмелина в Сибири. Н. Фитол. 209, 955–964. <https://doi.org/10.1111/nph.13759>.

Шнайдер, Л., Смердон, Дж. Э., Бюнтген, У., Уилсон, Р. Дж. С., Мыглан, В. С., Кирдянов, А. В., Эспер, Дж., 2015. Пересмотр летних температур в средних широтах до 600 г. н. э. на основе сети плотности леса. Geophys. Res. Lett. 42, 4556–4562. <https://doi.org/10.1002/2015GL063956>.

Швайнгрубер, Ф.Х., 1988. Годичные кольца: основы и применение дендрохронологии. Издательство Kluwer Academic, США.

Швайнгрубер, Ф.Х., Бриффа, К.Р., 1996. Сети плотности годовичных колец деревьев для климата реконструкция. Последние 2000 лет 43–66 Климат. Вар. Форсирование Мех. https://doi.org/10.1007/978-3-642-61113-1_3.

Швайнгрубер Ф., Фриттс Х., Брейкер О., Дрю Л., Шар Э., 1978. Рентгеновская техника как применительно к дендроклиматологии. Бюллетень колец деревьев. 38, 61–91.

Сефтиген, К., Фунтес, М., Лунгквист, ФК, Бьорклунд, Дж., 2020. Использование интенсивности синего цвета у чувствительной к засухе сосны обыкновенной в Фенноскандии для улучшения реконструкции прошлой изменчивости гидроклимата. Clim. Dyn. 55, 579–594. <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05287-2>.

Семеняк, Н., Долгова, Е., 2023. Дендроклиматические сигналы у сосны и ели Хронологии Соловецкого архипелага, Дендрохронология 77, 126029. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2022.126029>.

Сяттов С.Г., 1986. Дендрохронология высшей границы лесов Урала. Наука 136 (в Русский).

Силкин, П.П., Кирдянов, А.В., 2003. Связь между изменчивостью массы клеточных стенок ранней и поздней древесины трахеид в годовичных кольцах лиственницы, скоростью роста годовичных колец и климатическими изменениями. Holzforschung 57 (1), 1–7. <https://doi.org/10.1515/HF.2003.001>.

- Силкин П.П., Кирдянов А.В., Крушич П.Я., Екимов М.В., Баринов В.В., Бюнтген У., 2022. Новый подход к измерению параметров плотности годовичных колец деревьев. Журнал Сибирского федерального университета. Биол. 15 (4), 441–455. <https://doi.org/10.17516/1997-1389-0397>.
- Сент-Джордж, С., 2014. Обзор данных о ширине годовичных колец деревьев в Северном полушарии. Quat. Sci. Rev. 95, 132–150. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2014.04.029>.
- Сугимото, А., Янагисава, Н., Найто, Д., Фудзита, Н., Максимов, ТС, 2002. Значение вечной мерзлоты как источника воды для растений в восточносибирской тайге. Ecol. Res. 17, 493–503. <https://doi.org/10.1046/j.1440-1703.2002.00506.x>.
- Табакова М.А., Аразак А., Мартинес Э., Кирдянов А.В., 2020. Климатические факторы. контроль радиального роста *Pinus sylvestris* вдоль трансекты возрастающей континентальности в южной Сибири. Dendrochronologia 62. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2020.125709>.
- Ваганов Е.А., Щятов С.Г., Мазепа В.С. 1996. Дендроклиматические исследования в Урало-Сибирской Субарктике. Наука, Новосибирск, Россия.
- Ваганов Э.А., Хьюз М.К., Кирдянов А.В., Швайнгрубер Ф.Х., Силкин П.П., 1999. Влияние времени выпадения и таяния снега на рост деревьев в субарктической Евразии. Природа 400, 149–151. <https://doi.org/10.1038/22087>.
- Ваганов Е.А., Шашкин А.В., Сви́дерская И.В., Высоцкая Л.Г. 1985. Гистометрический анализ роста древесных растений. Наука, Новосибирск. (на русском языке).
- Висенте-Серрано, SM, Бегерия, С., Лопес-Морено, JJ, 2010. Мультишкалярный индекс засухи, чувствительный к глобальному потеплению: стандартизированный индекс осадков и эвапотранспирации. J. Clim. 23, 1696–1718. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1>.
- Виноградова, В., Титкова, Т., Золотокрылин, А., 2021. Как изменение климата влияет на переходные природные зоны северных и арктических регионов России. Polar Sci. 29. <https://doi.org/10.1016/j.polar.2021.100652>.
- Вьюхина, А.А., Гурская, МА, 2022. Дендроклиматический потенциал хронологий, основанных на интенсивности синего цвета, для сосны обыкновенной северной Фенноскандии. Журнал биологии Сиб. фед. ун-та, 15, 244–263. <https://doi.org/10.17516/1997-1389-0385>.
- Wang, F., Arseneault, D., Boucher, E., Galipaud Gloaguen, G., Deharte, A., Yu, S., Trou-kechout, N., 2020. Температурная чувствительность интенсивности синего цвета, максимальная плотность поздней древесины и данные о ширине годовичных колец живых деревьев черной ели в восточной канадской тайге. Dendrochronologia 64. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2020.125771>.
- Wigley, T., Briffa, K., Jones, P., 1984. О среднем значении коррелированных временных рядов с приложениями в дендроклиматологии и гидрометеорологии. J. Clim. Appl. Meteor. 23, 201–213. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1984\)023<0201:OTAVOC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1984)023<0201:OTAVOC>2.0.CO;2).
- Уилсон Р., Д'Арриго Р., Андреу-Хейлс Л., Олкерс Р., Уайлс Г., Анчукайтис К., Дэви, Н., 2017. Эксперименты на основе интенсивности синего цвета для реконструкции температур северной части Тихого океана вдоль залива Аляска. Climate 13, 1007–1022. <https://doi.org/10.5194/cp-13-1007-2017>.
- Уилсон, Р., Рао, Р., Райдвал, М., Вуд, К., Ларссон, Л.А., Лакман, Б.Х., 2014. Синий Интенсивность для дендроклиматологии: блюз Британской Колумбии: пример Британской Колумбии. Кан. Голоцен 24, 1428–1438. <https://doi.org/10.1177/0959683614544051>.
- Юэ, В., Сефтиген, К., Чэнь, Ф., Уилсон, Р., Чжан, Х., Мяо, Ю., Чэнь, Ю., Чжао, С., 2023. Интенсивность синего цвета годовичных колец *Picea schrenkiana* показывает, что недавняя потеря массы ледников в высокогорной Азии беспрецедентна за последние четыре столетия. Glob. Planet. Change 228, 104210. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2023.104210>.
- Занг, К., Бионди, Ф., 2013. Дендроклиматическая калибровка в R: пакет bootRes для Анализ функции отклика и корреляции. Dendrochronologia 31, 68–74. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2012.08.001>.