

Статья

Древесные хронологии верхней границы леса в России Горный Алтай демонстрирует сильное и стабильное лето Температурные сигналы

Кирдянов Александр Владимирович^{1,2,3,*}, Альберто Арзак³, Алина Александровна Кирдянова⁴, Тито Арозио¹, Овчинников Дмитрий Владимирович²,
Ганюшкин Дмитрий Александрович⁴, Павел Николаевич Катютин^{4,5}, Владимир Сергеевич Мыглан³, Андрей Николаевич Назаров³, Слюсаренко Игорь Юрьевич⁶,
Татьяна Бебчук¹ и Ульф Вьонтген^{1,7,8}

- ¹ Географический факультет Кембриджского университета, Кембридж CB2 3EN, Великобритания; ta530@cam.ac.uk (ТА);
tb649@cam.ac.uk (ТБ); ub223@cam.ac.uk (УБ)
- ² Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр СО РАН»,
Академгородок, Красноярск 660036, Россия; dovch@mail.ru
- ³ Институт экологии и географии Сибирского федерального университета, Свободный, 79, Красноярск, 660041, Россия;
aarzac@gmail.com (АА); v.myglan@gmail.com (ВМ); nazar_69@mail.ru (АНН)
- ⁴ Институт наук о Земле Санкт-Петербургского государственного университета, Санкт-Петербург 199034, Россия;
akird2002@mail.ru (ААК); ganushkinspbgu@mail.ru (ДАГ); paurussia@binran.ru (ПНК)
- ⁵ Ботанический институт РАН, ул. Профессора Попова, 2, Санкт-Петербург, 197022, Россия
- ⁶ Институт археологии и этнографии СО РАН, пр. Академика Лаврентьева, 17,
Новосибирск 630090, Россия; slig1963@yandex.ru
- ⁷ Географический факультет, Университет имени Масарика, 61137 Брно, Чешская Республика
- ⁸ Центр исследования глобальных изменений, 61300 Брно, Чешская Республика
- * Переписка: ak2118@cam.ac.uk



Цитирование: Кирдянов А.В.; Арзак, А.;
Кирдянова, АА; Арозио, Т.;
Овчинников Д.В.; Ганюшкин Д.А.;
Катютин, ПН; Мыглан, В.С.; Назаров,
АН; Слюсаренко И.Ю.; и др.

Древесные годовичные хронологии из
Верхняя граница леса на Русском Алтае
Горы показывают силу и стабильность
Летние температурные сигналы. Леса
2024, 15, 1402. <https://doi.org/10.3390/f15081402>

Научный редактор: Стив Чхин

Получено: 2 июля 2024 г.

Пересмотрено: 29 июля 2024 г.

Принято: 3 августа 2024 г.

Опубликовано: 10 августа 2024 г.



Авторские права: © 2024 принадлежат авторам.
Лицензиат MDPI, Базель, Швейцария.

Эта статья находится в открытом доступе.
распространяется на условиях и
условия Creative Commons

Лицензия Attribution (CC BY) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Аннотация: Радиальный рост деревьев на больших высотах и в высоких широтах в основном контролируется изменениями летней температуры. Однако ожидается, что эта связь ослабнет в соответствии с прогнозируемыми глобальное потепление, которое ставит под сомнение надежность хронологии годовичных колец для реконструкции климата. Здесь мы изучили модели реакции роста на климат для пяти ширин годовичных колец деревьев (TRW) и максимальных Хронологии плотности поздней древесины (MXD) лиственницы (*Larix sibirica*) из экотонных верхней границы леса на Алтае Горы, которые являются ключевым регионом для разработки тысячелетних дендроклиматических записей во внутренних районах Евразия. Хронологии TRW и MXD показали значительную годовую согласованность внутри и между двумя параметрами ($p < 0,001$). В то время как TRW в основном зависит от изменений температуры в течение первой половины вегетационного периода с июня по июль ($r = 0,66$) MXD наиболее сильно коррелирует с температурами мая-августа ($r = 0,73$). Все сезонные температурные сигналы статистически значимы на уровне достоверности 99%, временно стабильный вплоть до 1940 г. н.э., периода с надежными инструментальными данными измерения, и пространственно репрезентативны для обширной области внутренней Евразии между северо-восточной Казахстан на западе, северная Монголия на востоке, юг России на севере и северо-западе Китай на юге. Наши выводы демонстрируют палеоклиматический потенциал TRW и особенно MXD хронологии и отвергают любые признаки «проблемы расхождения» в этих высокогорных, среднеширотных лиственничные участки.

Ключевые слова: потенциал реконструкции климата; дендроклиматология; проблема дивергенции (DP); глобальный потепление; пространственно-временная однородность

1. Введение

Рост деревьев в большинстве высокогорных и высокоширотных регионов Евразии в настоящее время чувствительны к температуре и в основном контролируются летней температурой изменчивость [1]. Данные годовичных колец из таких регионов считаются ценным климатическим прокси-сервером и широко используются в реконструкциях локальных и глобальных температур [2]. Однако,

Ожидается, что зависимость роста деревьев от температуры ослабеет в условиях прогнозируемого глобального потепления и даже перестанет зависеть от температуры в течение 21 века [3].

Потеря чувствительности роста деревьев в экосистемах, предположительно ограниченных температурой, к повышению летних температур в высокочастотных или низкочастотных областях или в обеих, так называемая «проблема дивергенции» (DP) [4], была впервые отмечена для белой ели (*Picea glauca*) на Аляске. Исследование продемонстрировало ослабленные сигналы ширины годичного кольца и максимальной плотности поздней древесины на высокоширотных и высокогорных участках в ответ на повышение температуры с конца 1970-х годов. В последнее время DP был описан для различных видов деревьев в разных регионах, в основном в высокоширотных и высокогорных экосистемах (см. обзор [4]). Бриффа и др. [6] и Уилсон и др. [7] представили доказательства того, что DP является широко распространенным явлением в циркумполярных высокоширотных лесах. DP также был обнаружен в нескольких высокогорных лесах в более низких широтах [8–10]. Однако некоторые недавние исследования показали, что DP не наблюдается на всех участках с ограниченной температурой, что подразумевает, что DP является пространственно неоднородным явлением [2,11–13]. Требуется лучшее понимание масштаба и региональности DP, поскольку это явление может повлиять на способность данных о годичных кольцах служить косвенным показателем температуры в прошлые теплые периоды [2]. Особое внимание следует уделять регионам с высоким палеодендроклиматическим потенциалом, таким как Горный Алтай [14,15].

Алтайские горы — одна из крупнейших горных систем в Азии, которая простирается между 47–53 с.ш. и 84–92 в.д. и находится в приграничном регионе, граничащем с Россией на севере, Китаем на юге, Казахстаном на юго-западе и Монголией на юго-востоке.

Алтай служит важнейшей климатической границей, где североатлантические климатические системы с запада взаимодействуют с тихоокеанскими климатическими системами с востока. Это взаимодействие привело к недавнему повышению температуры как на Северном, так и на Южном Алтае [16]. Этот район является местом происхождения долгоживущих деревьев [17] и источником реликтовой древесины, которая используется для разработки многотысячелетних хронологий ширины годичных колец (TRW) [14,18–20] и более коротких, но чрезвычайно ценных хронологий других параметров годичных колец, включая максимальную плотность поздней древесины (MXD), состав стабильных изотопов годичных колец, структуру клеток и интенсивность синего цвета (V). Эти данные предоставляют информацию не только о динамике лесов в регионе [24–27], но также позволяют понять зависимость роста деревьев от климата и служат индикаторами различных климатических переменных, таких как температура [15,19,28,29], осадки [30,31], засухи [32,33], относительная влажность воздуха [34] и заморозки [35].

Реконструкции на основе годичных колец из Алтайских гор и соседних горных хребтов служат основой для понимания изменчивости климата в обширном регионе Центральной Азии [15,36]. Эти данные можно сопоставить с динамикой климата, реконструированной по ледяным кернам [37], элементарному составу [38], данным по пыльце из озерных отложений [39,40], данным по пыльце из почвенных профилей и геоморфологическим данным [41] и липидам из торфяных кернов [42]. В этом контексте дальнейшее развитие и обновление существующей сети годичных колец в Алтайских горах и понимание недавних изменений в реакции годичных колец на климат при текущем потеплении являются неотложными. Особое внимание следует уделять измерениям TRW и MXD из верхней границы леса, поскольку эти параметры обычно тесно связаны с летними изменениями температуры и, следовательно, могут быть подвержены DP.

Здесь мы исследовали радиальный рост и чувствительность к климату пяти участков лиственницы верхней границы леса по всему Центральному Алтаю. Мы проанализировали временную стабильность и пространственную протяженность климатического отклика недавно разработанных хронологий ширины годичного кольца и максимальной плотности поздней древесины, чтобы проверить их подверженность «проблеме расхождения» и оценить их потенциал реконструкции. Мы выдвинули гипотезу, что рост деревьев в исследуемом регионе напрямую зависит от потепления климата, а параметры годичных колец сохраняют свою чувствительность к изменениям температуры.

2. Материалы и методы

Образцы древесины были собраны в верхней части границы леса в Горном Алтае (рисунок 1). По данным инструментальных наблюдений на высокогорной метеорологической станции Кара-Тюрек (50° 02' с.ш., 86° 27' в.д.; WMO 36442; 1940–2022 гг.), климат в районе исследований характеризуется как резко континентальный, с низкими среднегодовыми температурами -5,4 °C. Самые теплые и самые холодные месяцы — июль и январь, с месячной температурой 7,1 °C.

характеризуется как резко континентальный, с низкими среднегодовыми температурами $-5,4^{\circ}\text{C}$. Самые теплые и самые холодные месяцы — июль и январь, с месячной температурой $7,1^{\circ}\text{C}$ и $-16,4^{\circ}\text{C}$ соответственно. Годовое годовое количество осадков составляет около 620 мм , из которых 146 мм (46%) выпадает в течение месяцев (июня по август).

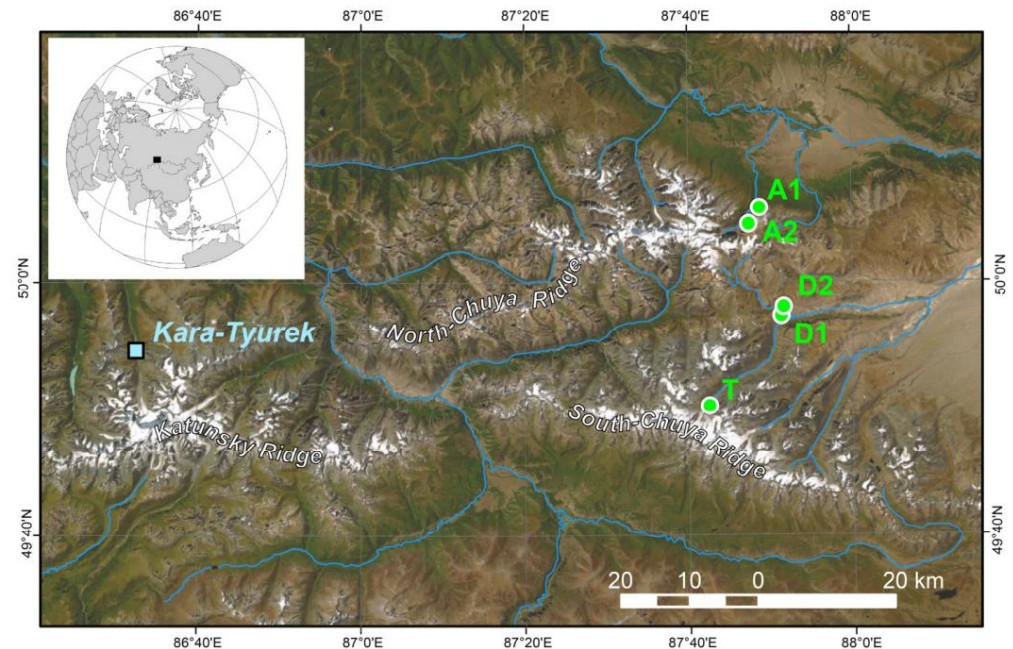


Рисунок 1. Рисунок может быть простодлиной единичных элементов (элементов) и квадрата (квадрата). Рисунок (элемент) и квадрат (квадрат).

Годовыя валавыя і агульныя сумы ападкаў у перыяд 1980-1989 годаў былі ў асноўным устойлівымі, тады ж і летнія і зімовыя сумы ападкаў. У 1980-1989 годах (рисункі 23, 24) у 1983 г. і 1984 г. ападкаў было менш, чым у 1980-1982 і 1986-1989 гадах. У 1983 г. ападкаў было менш, чым у 1980-1982 і 1986-1989 гадах. У 1984 г. ападкаў было менш, чым у 1980-1982 і 1986-1989 гадах. У 1985 г. ападкаў было менш, чым у 1980-1982 і 1986-1989 гадах. У 1986 г. ападкаў было менш, чым у 1980-1982 і 1986-1989 гадах. У 1987 г. ападкаў было менш, чым у 1980-1982 і 1986-1989 гадах. У 1988 г. ападкаў было менш, чым у 1980-1982 і 1986-1989 гадах. У 1989 г. ападкаў было менш, чым у 1980-1982 і 1986-1989 гадах.

Лиственница сибирская (*Larix sibirica* Ledeb.), которая, как было показано, чувствительна к изменчивости летних температур [14,15,22,23], является одним из доминирующих видов деревьев на верхней границе леса в исследуемом регионе. В ходе нескольких полевых кампаний между 2007 и 2023 годами мы отобрали пять различных насаждений в экотоне верхней границы леса в трех долинах Центрального Алтая, связанных с ледниками Ак-Тру (участки A1 и A2), Джело (D1 и D2) и Талдура (Т) (Рисунки 1 и S1–S4; Таблицы 1 и S1). Мы собрали древесину со здоровых доминирующих и со-доминирующих живых лиственниц на высотах от 2100–2150 м над уровнем моря на участке A2 до 2400–2500 м над уровнем моря на участке Т. На всех участках, за исключением A2, лиственница была единственным видом деревьев. Хотя мы стремились взять керн из старых деревьев, насаждение на самом высоком участке Т было сформировано из лиственниц возрастом <100 лет, поскольку оно развивалось на территории, недавно покрытой ледником [43]. Было взято керн минимум из 16 живых деревьев, по крайней мере, с двумя кернами на дерево, из которых один керн использовался для дальнейших измерений TRW и MXD. На трех участках, A2, D2 и Т, TRW измеряли с точностью 0,01 мм с помощью измерительного устройства LINTAB и программного обеспечения TSAPWin 4.68c (RINNTECH eK, Гейдельберг, Германия). Для кернов с участков A1 и D1 мы измерили TRW и MXD с помощью рентгеновского микроденситометра DENDRO-2003 (WALESCH Electronic GmbH, Effretikon, Швейцария) согласно [44]. Все серии были визуально перекрестно датированы и статистически проверены на отсутствие колец и ошибки датирования с помощью программы COFECHA 6.06 [45].

Отдельные серии TRW и MXD были стандартизированы для удаления неклиматических, геометрических и возрастных тенденций [46]. Из-за разного среднего возраста деревьев на участках отдельные серии TRW и MXD были стандартизированы с помощью кубического сплайна, зависящего от возраста (версия программного обеспечения ARSTAN v49, [https://www.geog.cam.ac.uk/research/projects/ дендрософт/](https://www.geog.cam.ac.uk/research/projects/дендрософт/), последний доступ 25 июня 2024 г.). Кроме того, перед удалением тенденции роста к ряду MXD было применено адаптивное преобразование мощности (PT; [47]) .

Рисунок 1. Расположение точек взятия годичных колец (светло-зеленые круги) и метеостанции (светло-голубой квадрат).

Годовые и летние (июнь–август) средние температуры были относительно стабильными до начала 1980-х годов (рисунок 2а). С 1983 года температура увеличилась на 0,38 и 1,33 °C. Для летних осадков (июнь–август) среднее значение (100 мм) было рассчитано. Летние суммы осадков (июнь–август) были выбраны в ходе дальнейшего анализа, чтобы проследить тенденции в климатических данных.

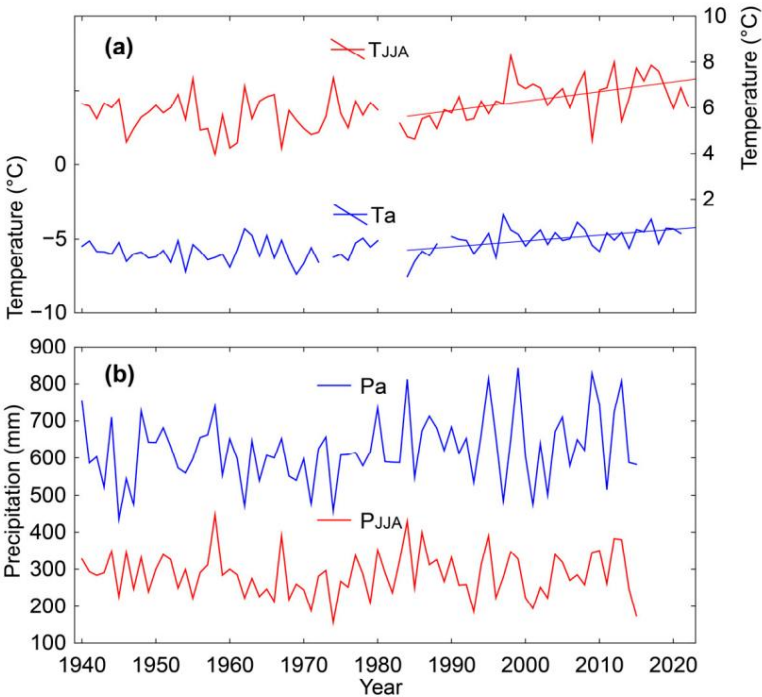


Рисунок 2. Летние (красные) и среднегодовые (синие) температуры (а) и осадки (б), зарегистрированные в высокогорная метеостанция Кара-Тюрек вблизи лесных участков. Линии показывают статистически значимые ($p < 0,05$) тенденции с течением времени с 1984 года.

Таблица 1. Статистика ширины годичных колец (TRW) и максимальной плотности поздней древесины (MXD) локальных хронологий (MSL = средняя длина сегмента (среднее значение \pm SD = среднее значение TRW или MXD \pm стандартное отклонение); CS = коэффициент чувствительности; Rbar = межсерийная корреляция; EPS = выраженный популяционный сигнал).

Сайт	Высота, м над уровнем моря	Кольцо дерева Параметр	N из Ряд	Период CE MSL		Среднее значение ± СД	Иметь в виду КС	Иметь в виду Рбар	Иметь в виду EPS	
A1	2200–2300 трлн. в.		18	1653–2014	262	0,67 ± 0,32 мм	0,202	0,472	0,916	
A2	2100–2150 ТРВ		20	1554–2021	269	0,79 ± 0,35 мм	0,225	0,508	0,915	
D1	2200–2300 трлн.		23	1478–2006	325	0,42 ± 0,22 мм	0,271	0,503	0,925	
D2	2360–2400 трлн.		16	1715–2021	198	0,62 ± 0,30 мм	0,310	0,520	0,899	
T	2400–2500 трлн. руб.		20	1936–2022	63	1,17 ± 0,44 мм	0,234	0,456	0,925	
A1	2200–2300 MXD		18	1653–2014	262	0,86 ± 0,10 г/см3	0,86 ±	0,07	0,526	0,934
D1	2200–2300 MXD		23	1478–2006	325	0,10 г/см3		0,08	0,531	0,934

Всего мы разработали пять локальных (сайтовых) хронологий TRW и две хронологии MXD (таблица 1). Длина хронологий TRW варьировалась от 87 (участок T) до 529 (D1) лет, с самой низкой и наивысшая средняя длина сегмента (MSL) для тех же сайтов, соответственно. Среднее Скорость роста была, как правило, ниже у старых деревьев. Хронологии TRW были чувствительны к сигнал окружающей среды (коэффициент чувствительности $> 0,200$), который синхронизировал радиальный роста отдельных деревьев и объяснил высокую межсерийную корреляцию ($Rbar > 0,456$). Многовековые хронологии MXD также характеризовались высоким Rbar, но гораздо более низкая чувствительность по сравнению с TRW. Выраженный сигнал популяции (EPS), который измеряет, насколько хорошо хронологии, построенные на ограниченном количестве образцов, представляют теоретически бесконечную популяцию, был выше общепринятого порога 0,85 [48] для всех хронологий TRW и MXD. Репликация серий 16–23 и высокий Rbar и значения EPS подтвердили пригодность хронологий индексов TRW и MXD для

Дендроклиматический анализ за период с имеющимися инструментальными записями температуры и осадков.

Для дальнейшего анализа мы также использовали региональные хронологии, которые были рассчитаны как средние значения локальных индексных хронологий в ARSTAN. Региональная хронология TRW была построена из пяти локальных индексных хронологий TRW, а две локальные индексные хронологии MXD были использованы для построения региональной хронологии MXD. Эта процедура позволила нам выровнять веса данных с участков с различными локальными условиями, повторениями образцов и возрастами деревьев.

Для оценки климатической чувствительности записей TRW и MXD были рассчитаны коэффициенты корреляции Пирсона относительно среднемесячных температур и сумм осадков с ближайшей метеорологической станции Кара-Тюрек за предыдущий год сентябрь– сентябрь текущего года. Для оценки сезонных климатических влияний использовались температуры июня–июля (JJ), лета (JJA) и мая–августа (MJJJA), а также сумма осадков за лето. Для оценки временной стабильности связей между региональными хронологиями годовых колец и климатическими записями мы использовали бегущие корреляции, рассчитанные для 25-летнего окна с шагом в 1 год с растущими сезонными средними температурами. Пространственные корреляции между региональными хронологиями TRW и MXD и средними сезонными температурами в сетке (CRU TS4.07, [49]) были рассчитаны с помощью KNMI Climate Explorer (<https://climexp.knmi.nl/start.cgi>, последний доступ 25 июня 2024 г.) за период с имеющимися инструментальными записями температуры на ближайшей высокогорной станции Кара-Тюрек с 1940 г.

3. Результаты

Локальные хронологии индекса TRW продемонстрировали высокую синхронность в индексах радиального роста на разных участках (таблица 2; рисунок 3). Высокие статистически значимые корреляции ($p < 0,000001$) до $r = 0,79$ ($N = 362$) наблюдались между четырьмя более длинными хронологиями A1, A2, D1 и D2. Для самой короткой хронологии T корреляции были ниже, но статистически значимы при $p < 0,002$. Корреляция между двумя доступными хронологиями индекса MXD была выше, чем для TRW, при $r = 0,62$ и $0,49$ ($N = 354$) соответственно. Также были отмечены заметные корреляции между записями TRW и MXD из одного и того же сайтов, которые варьировались от $r = 0,50$ ($N = 362$) для A1 до $r = 0,71$ ($N = 529$) для сайта D1.

Таблица 2. Коэффициенты корреляции и количество случаев (N) между локальными индексными хронологиями.

Сайт	A2	D1	D2	T
A1	0,79 N = 362	0,49 N = 354	0,48 N = 300	0,36 N = 79
A2		0,61 N = 453	0,52 N = 307	0,50 N = 86
D1			0,63 N = 292	0,50 N = 71
D2				0,33 N = 86

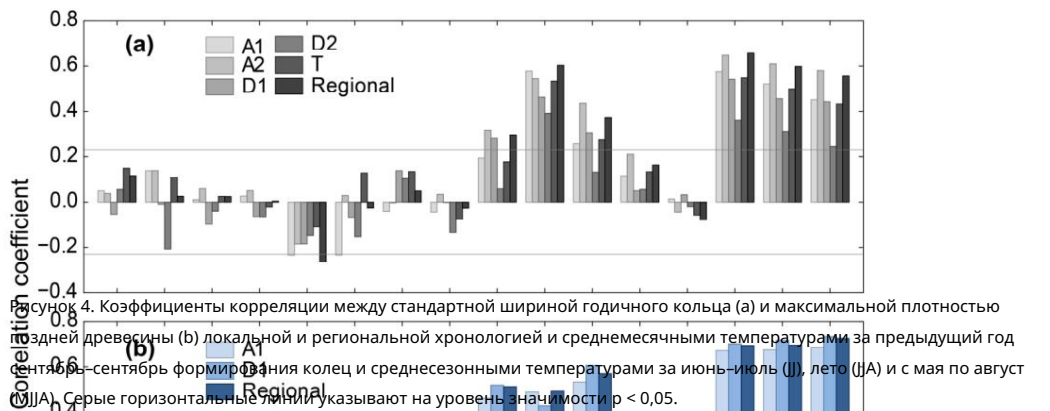
Примечание: коэффициенты корреляции значимы при $p < 0,002$, а значения, значимые при $p < 0,0000001$, выделены жирным шрифтом .

Региональные хронологии индексов TRW и MXD продемонстрировали общую картину высоко- и среднечастотной изменчивости (рисунок 3). Удивительно низкие значения индекса в обеих записях наблюдались около 1700 г. н. э. и в течение первых десятилетий 19-го века. Позднее индексы характеризовались общей тенденцией к росту до последнего десятилетия 20-го века. Интересно, что как индексы TRW, так и MXD в целом стабилизировались или даже снизились в 21-м веке. Коэффициент корреляции между региональными хронологиями составил 0,63 ($N = 537$; $p < 0,000001$), который увеличился до 0,73 для записей, сглаженных 30-летним кубическим сплайном.

Ежемесячный анализ реакции климата показал, что TRW лиственницы в верхней границе леса в основном зависела от температуры с мая по июль (рисунок 4а). Самые высокие корреляции были обнаружены для локальных A1 ($r = 0,58$), A2 ($r = 0,55$) и T ($r = 0,54$) и региональных

Итак, в результате анализа полученных данных по температуре воздуха в течение вегетационного периода (таблица 52) и по температуре воздуха в июле (таблица 53) и в августе (таблица 54) для участков A1, A2, B1, B2, C1, C2, D1, D2, D3, D4, D5, D6, D7, D8, D9, D10, D11, D12, D13, D14, D15, D16, D17, D18, D19, D20, D21, D22, D23, D24, D25, D26, D27, D28, D29, D30, D31, D32, D33, D34, D35, D36, D37, D38, D39, D40, D41, D42, D43, D44, D45, D46, D47, D48, D49, D50, D51, D52, D53, D54, D55, D56, D57, D58, D59, D60, D61, D62, D63, D64, D65, D66, D67, D68, D69, D70, D71, D72, D73, D74, D75, D76, D77, D78, D79, D80, D81, D82, D83, D84, D85, D86, D87, D88, D89, D90, D91, D92, D93, D94, D95, D96, D97, D98, D99, D100, D101, D102, D103, D104, D105, D106, D107, D108, D109, D110, D111, D112, D113, D114, D115, D116, D117, D118, D119, D120, D121, D122, D123, D124, D125, D126, D127, D128, D129, D130, D131, D132, D133, D134, D135, D136, D137, D138, D139, D140, D141, D142, D143, D144, D145, D146, D147, D148, D149, D150, D151, D152, D153, D154, D155, D156, D157, D158, D159, D160, D161, D162, D163, D164, D165, D166, D167, D168, D169, D170, D171, D172, D173, D174, D175, D176, D177, D178, D179, D180, D181, D182, D183, D184, D185, D186, D187, D188, D189, D190, D191, D192, D193, D194, D195, D196, D197, D198, D199, D200, D201, D202, D203, D204, D205, D206, D207, D208, D209, D210, D211, D212, D213, D214, D215, D216, D217, D218, D219, D220, D221, D222, D223, D224, D225, D226, D227, D228, D229, D230, D231, D232, D233, D234, D235, D236, D237, D238, D239, D240, D241, D242, D243, D244, D245, D246, D247, D248, D249, D250, D251, D252, D253, D254, D255, D256, D257, D258, D259, D260, D261, D262, D263, D264, D265, D266, D267, D268, D269, D270, D271, D272, D273, D274, D275, D276, D277, D278, D279, D280, D281, D282, D283, D284, D285, D286, D287, D288, D289, D290, D291, D292, D293, D294, D295, D296, D297, D298, D299, D300, D301, D302, D303, D304, D305, D306, D307, D308, D309, D310, D311, D312, D313, D314, D315, D316, D317, D318, D319, D320, D321, D322, D323, D324, D325, D326, D327, D328, D329, D330, D331, D332, D333, D334, D335, D336, D337, D338, D339, D340, D341, D342, D343, D344, D345, D346, D347, D348, D349, D350, D351, D352, D353, D354, D355, D356, D357, D358, D359, D360, D361, D362, D363, D364, D365, D366, D367, D368, D369, D370, D371, D372, D373, D374, D375, D376, D377, D378, D379, D380, D381, D382, D383, D384, D385, D386, D387, D388, D389, D390, D391, D392, D393, D394, D395, D396, D397, D398, D399, D400, D401, D402, D403, D404, D405, D406, D407, D408, D409, D410, D411, D412, D413, D414, D415, D416, D417, D418, D419, D420, D421, D422, D423, D424, D425, D426, D427, D428, D429, D430, D431, D432, D433, D434, D435, D436, D437, D438, D439, D440, D441, D442, D443, D444, D445, D446, D447, D448, D449, D450, D451, D452, D453, D454, D455, D456, D457, D458, D459, D460, D461, D462, D463, D464, D465, D466, D467, D468, D469, D470, D471, D472, D473, D474, D475, D476, D477, D478, D479, D480, D481, D482, D483, D484, D485, D486, D487, D488, D489, D490, D491, D492, D493, D494, D495, D496, D497, D498, D499, D500, D501, D502, D503, D504, D505, D506, D507, D508, D509, D510, D511, D512, D513, D514, D515, D516, D517, D518, D519, D520, D521, D522, D523, D524, D525, D526, D527, D528, D529, D530, D531, D532, D533, D534, D535, D536, D537, D538, D539, D540, D541, D542, D543, D544, D545, D546, D547, D548, D549, D550, D551, D552, D553, D554, D555, D556, D557, D558, D559, D560, D561, D562, D563, D564, D565, D566, D567, D568, D569, D570, D571, D572, D573, D574, D575, D576, D577, D578, D579, D580, D581, D582, D583, D584, D585, D586, D587, D588, D589, D590, D591, D592, D593, D594, D595, D596, D597, D598, D599, D600, D601, D602, D603, D604, D605, D606, D607, D608, D609, D610, D611, D612, D613, D614, D615, D616, D617, D618, D619, D620, D621, D622, D623, D624, D625, D626, D627, D628, D629, D630, D631, D632, D633, D634, D635, D636, D637, D638, D639, D640, D641, D642, D643, D644, D645, D646, D647, D648, D649, D650, D651, D652, D653, D654, D655, D656, D657, D658, D659, D660, D661, D662, D663, D664, D665, D666, D667, D668, D669, D670, D671, D672, D673, D674, D675, D676, D677, D678, D679, D680, D681, D682, D683, D684, D685, D686, D687, D688, D689, D690, D691, D692, D693, D694, D695, D696, D697, D698, D699, D700, D701, D702, D703, D704, D705, D706, D707, D708, D709, D710, D711, D712, D713, D714, D715, D716, D717, D718, D719, D720, D721, D722, D723, D724, D725, D726, D727, D728, D729, D730, D731, D732, D733, D734, D735, D736, D737, D738, D739, D740, D741, D742, D743, D744, D745, D746, D747, D748, D749, D750, D751, D752, D753, D754, D755, D756, D757, D758, D759, D760, D761, D762, D763, D764, D765, D766, D767, D768, D769, D770, D771, D772, D773, D774, D775, D776, D777, D778, D779, D780, D781, D782, D783, D784, D785, D786, D787, D788, D789, D790, D791, D792, D793, D794, D795, D796, D797, D798, D799, D800, D801, D802, D803, D804, D805, D806, D807, D808, D809, D810, D811, D812, D813, D814, D815, D816, D817, D818, D819, D820, D821, D822, D823, D824, D825, D826, D8

на температуру была стабильной с течением времени, а средние корреляции были немного выше для MJJA ($r = 0,78$), чем для JJA ($0,77$) и JJ ($0,76$).



Корреляции, бегущие в 25-летнем окне между региональной хронологией TRW и средними сезонными температурами, показали, что зависимость радиального роста от температуры была положительной и в основном статистически значимой при $p < 0,05$ за период с 1940 года (рисунок 5a). Все три последовательности коэффициентов бегущей корреляции характеризовались слегка убывающими тенденциями к настоящему времени. В целом более высокие корреляции наблюдались с течением времени для температур JJ (среднее $r = 0,63$), которые достигли $r > 0,7$ в течение первой части анализируемого периода и, позднее, упали примерно до $0,55$ ($p < 0,01$). Корреляция MXD со средними сезонными температурами была сильнее, чем для TRW, причем коэффициенты корреляции часто были выше $0,8$ (рисунок 5b). Зависимость MXD от температуры была стабильной с течением времени, а средние корреляции были немного выше для MJJA ($r = 0,78$), чем для JJA ($0,77$) и JJ ($0,76$).

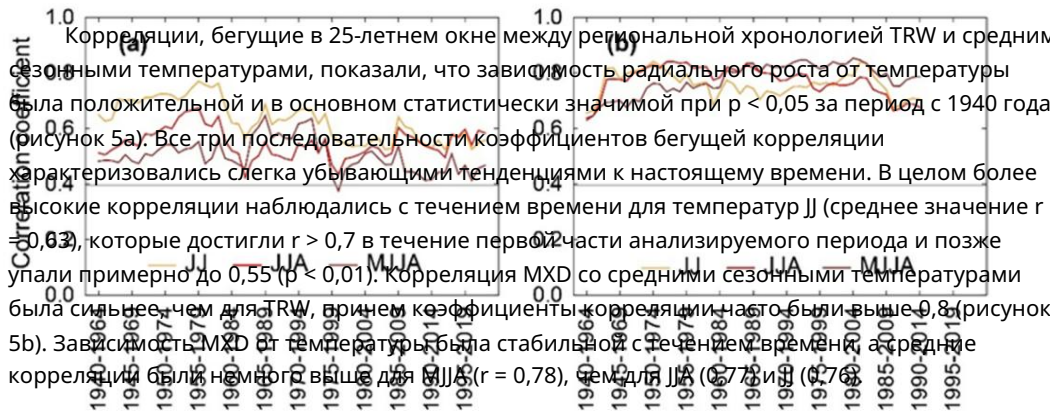
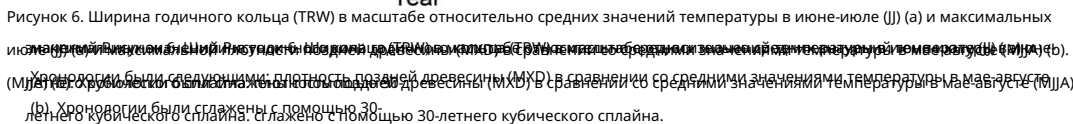
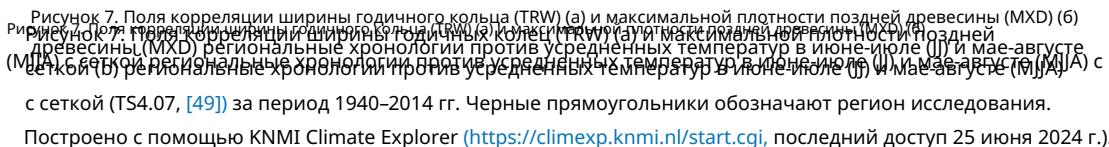


Рисунок 5. Корреляции двадцатипятилетнего окна между региональной шириной годичных колец (a) и максимальной плотностью поздней древесины (b) индексными хронологиями и средними сезонными температурами июня-июля (JJ), июля (JJA) и мая-августа (MJJA). Серые горизонтальные линии указывают на уровень значимости $p < 0,05$.

Региональные хронологии TRW и MXD хорошо отразили межгодовые и многодесятилетние изменения в инструментальных записях температуры JJ и MJJA соответственно (рисунок 6). Следуя тенденциям изменения температуры, региональные хронологии годичных колец деревьев характеризовались слегка снижающейся тенденцией в 21 веке, которая последовала за ростом с 1980-х годов и относительно стабильными декадными температурами до этого. Высокая корреляция, полученная между ежегодно определяемыми годичными кольцами деревьев и климатическими записями (см. Рисунок 4), дополнительно увеличилась до $0,97$ ($N = 83$) между температурами TRW и JJ и $0,85$ ($N = 75$) между температурами MXD и MJJA для записей, сглаженных с помощью 30-летнего сплайна (Рисунок 6). Рисунок 5. Корреляции двадцатипятилетнего окна между региональной шириной годичных колец (a) и максимальной плотностью поздней древесины (b) индексными хронологиями и средними сезонными температурами июня-июля (JJ), лета (JJA) и мая-августа (MJJA). Серые горизонтальные линии указывают на уровень значимости $p < 0,05$.



Пространственная температурная сигнатура региональной хронологии MXD (рисунок 7b) была больше, чем у TRW (рисунок 7a). Однако высокие корреляции дерева - больше, чем у TRW (рисунок 7a). Водяные условия контролировали прирост деревьев в северной половине MXD, тогда как в южной половине MXD охватывали значительную часть записей со средними летними температурами в сетке охватывали значительную часть северной части Внутренней Азии. Температуры в северной части Внутренней Азии, а также в Сибири



Наши результаты показывают, что лиственницы на верхней границе леса в центральных горах Алтая демонстрируют очень когерентный рост в различных условиях. Высотный диапазон в 350 м исследуемых участков, расположенных от 2100 до 2450 м над уровнем моря, соответствует разнице примерно в 2 °C в среднегодовой температуре между местообитаниями [50]. Такая разница температур может привести к значительным изменениям, специфичным для участка, во внутри- и межгодовой изменчивости сезонной активности деревьев лиственницы [51, 52]. Местные условия, включая ска-

аспект, плотность насаждения, наземная растительность, воздействие ветра, условия вечной мерзлоты и т. д. могут дополнительно значительно модулировать динамику радиального роста деревьев [53–57]. Однако, несмотря на различия в местных условиях, TRW и MXD были высоко синхронизированы в пределах и между нашими участками исследования, что указывает на наличие общего климатического фактора, сильно ограничивающего рост деревьев в регионе.

Предыдущие исследования на Алтае и в соседних горных регионах указали на летнюю температуру как на основной фактор, определяющий радиальный рост дерева на верхней границе леса [15,29,57–59], и наши результаты подтверждают эти более ранние выводы (рисунок 3). Температурные сигнатуры ранее были обнаружены не только в TRW и MXD, но и в других параметрах годовичных колец, включая толщину клеточной стенки поздней древесины, стабильный изотопный состав целлюлозы годовичных колец и BI [21,22,60]. Однако MXD обычно имеет большую точность в сборе метеорологической информации [12,61–63], и обычно считается наиболее качественной прокси-переменной годовичных колец для реконструкций температуры [64,65]. Данные о структуре клеток иногда могут работать лучше, чем MXD, при представлении сезонных температур роста [22,66]; однако процесс измерений анатомии древесины еще более трудоемкий и длительный, чем для MXD. В этом контексте перспективными являются подходы, основанные на бинарном (черно-белом) представлении анатомических структур на поверхностях образцов годовичных колец и объединяющие достижения методов BI, анатомии древесины и MXD [61,67,68].

В этом исследовании мы показали, что MXD тесно коррелирует с температурными переменными и накапливает климатическую информацию за более длительный период вегетационного периода (май–август) по сравнению с TRW (июнь–июль). Это явление хорошо известно в науке о кольцах деревьев [44,69,70] и объясняется физиологией и фенологией формирования колец деревьев и поздней древесины [23,71,72]. Эти результаты подтверждают превосходство MXD лиственницы из верхней границы леса на Алтае в качестве прокси для сезонных температур роста. Широкий пространственный охват статистически значимых корреляций демонстрирует способность наших записей колец деревьев фиксировать температурные сигналы на обширной территории внутренней Евразии, которая включает северо-восточный Казахстан на западе, северо-западную Монголию на востоке, южную Сибирь (Россия) на севере и северо-восточный Китай на юге.

Мы обнаружили, что как параметры годовичных колец, так и особенно MXD продемонстрировали высокую временную стабильную чувствительность к росту сезонной температуры. Более того, хронологии следовали за недавним потеплением и стабилизацией температуры в последние несколько лет (рисунок 6). Эти результаты свидетельствуют об отсутствии «проблемы дивергенции» в исследуемой области. Хотя DP является региональным и локальным явлением [11,13], мы предполагаем, что верхняя граница леса в горах Алтая менее подвержена ослаблению связи роста и температуры, поскольку DP обычно менее выражена в средних широтах [6,73], а Алтай удален от источников промышленного загрязнения [74]. Более того, летняя температура в верхней границе леса на исследуемых участках в горах Алтая все еще низкая, не достигая порога, выше которого влияние температуры на формирование годовичных колец резко уменьшается [72]. Кроме того, исследуемые высокогорные участки расположены близко к ледникам и труднодоступны, не получая прямого воздействия от деятельности человека.

В настоящее время Алтай является одним из немногих регионов в мире, где (i) годовичные кольца деревьев предоставляют надежную информацию об изменениях температуры, (ii) растут старые деревья [17] и (iii) доступна реликтовая древесина. В регионе уже создан ряд тысячелетних хронологий [14,19]. Текущие усилия нашей команды направлены на построение непрерывных абсолютно датированных хорошо реплицированных региональных хронологий TRW и MXD, которые охватывают последние два-три тысячелетия. В этом контексте наши выводы о широкой пространственной сигнатуре и временной стабильности температурных сигналов в TRW, и особенно MXD, имеют большое значение для будущих палеоклиматических реконструкций. После разработки региональной температурной реконструкции на основе MXD не только предоставит данные о локальном и региональном климате позднего голоцена, но также может помочь лучше понять землепользование и историю человечества в горах Алтая [15,75,76].

5. Выводы

Результаты нашего исследования показывают, что температурные сигналы в локальных и региональных хронологиях ширины годичных колец и максимальной плотности поздней древесины лиственницы сибирской из верхней границы леса в Центральном Алтае сильны и стабильны во времени. Это свидетельствует об отсутствии «проблемы расхождения» в данных годичных колец и указывает на высокий палеоклиматический потенциал хронологий годичных колец лиственницы верхней границы леса. Текущие усилия, направленные на разработку сети хорошо воспроизводимых, абсолютно датированных тысячелетних хронологий годичных колец, станут основой для совместной многопараметрической дендроклиматологии, которая предоставит возможность для лучшего понимания палеоклимата и истории человечества на Алтае и в прилегающих регионах.

Дополнительные материалы: следующую вспомогательную информацию можно загрузить по адресу: <https://www.mdpi.com/article/10.3390/f15081402/s1>. Рисунок S1: Участок A1. Фото Д.В. Овчинникова; Рисунок S2: Участок A2. Фото А.В. Кирдянова; Рисунок S3: Участок D1. Фото В.С. Мыглана; Рисунок S4: Участок Т. Фото Д.А. Ганюшкина; Таблица S1: Местоположение участка; Таблица S2: Коэффициенты корреляции между стандартной шириной годичного кольца (TRW) и максимальной плотностью поздней древесины (MXD) локальными и региональными хронологиями и месячными суммами осадков с сентября по сентябрь предыдущего года формирования колец.

Вклад авторов: Концептуализация, AVK; методология, AVK и UB; исследование, AVK и TA; обработка данных AVK, AA, AAK, DVO, PNK, VSM, ANN и IYS; написание — подготовка оригинального черновика, AVK и UB; написание — рецензирование и редактирование, AAK, AA, AAK, TA, PNK, IYS, TB и UB; визуализация, AVK и DAG; получение финансирования, AA, DVO, DAG и UB Все авторы прочитали и согласились с опубликованной версией рукописи.

Финансирование: Работа выполнена при поддержке проектов Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (ФСРЗ-2020-0014 и ФСРЗ-2023-0007) (предоставившего оборудование). Данные по одному из участков были собраны и проанализированы в рамках Российского научного фонда (проект № 22-67-00020). UB получил финансирование от Чешского научного фонда (#23-08049S; Hydro8), гранта ERC Advanced (#882727; Monostar) и гранта ERC Synergy (#101118880; Synergy-Plague).

Заявление о доступности данных: данные, представленные в этом исследовании, доступны по запросу у соответствующего автора.

Конфликты интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Ссылки

1. Джордж, СС Обзор данных о ширине годичных колец деревьев в Северном полушарии. *Quat. Sci. Rev.* 2014, 95, 132–150. [\[CrossRef\]](#)
2. Бюнтген, У.; Аллен, К.; Анчукайтис, К.; Арсено, Д.; Буше, Э.; Браунинг, А.; Чаттерджи, С.; Керубини, П.; Чуракова, О.В.; Корона, К.; и др. Влияние принятия решений на климатические реконструкции на основе годичных колец деревьев. *Nat. Commun.* 2021, 12, 3411. [\[Перекрестная ссылка\]](#) [\[PubMed\]](#)
3. Камареро, Джей Джей; Газоль, А.; Санчес-Сальгеро, Р.; Фахардо, А.; Макинтайр, ЕJB; Гутьеррес, Э.; Батллори, Э.; Будро, С.; Каррер, М.; Дьес, Дж.; и др. Глобальное затухание связи роста температуры на альпийских и полярных границах деревьев. *Глоб. Чанг. Биол.* 2021, 27, 1879–1889. [\[Перекрестная ссылка\]](#) [\[PubMed\]](#)
4. D'Arrigo, R.; Wilson, R.; Liepert, B.; Cherubini, P. О «проблеме расхождения» в северных лесах: обзор данных годичных колец и возможных причин. *Glob. Planet. Chang.* 2008, 60, 289–305. [\[CrossRef\]](#)
5. Якоби, GC; Д'Арриго, Р. Ширина и плотность годичных колец деревьев, свидетельствующие о климатических и потенциальных изменениях лесов на Аляске. *Глоб. Биогеохим. Циклы* 1995, 9, 227–234. [\[CrossRef\]](#)
6. Briffa, KR; Schweingruber, FH; Jones, PD; Osborn, TJ; Shiyats, SG; Vaganov, EA Снижение чувствительности недавнего роста деревьев к температуре в высоких северных широтах. *Nature* 1998, 391, 678–682. [\[CrossRef\]](#)
7. Уилсон, Р.; Д'Арриго, Р.Д.; Бакли, Б.М.; Бюнтген, У.; Эспер, Дж.; Франк, Д.; Лакман, Б.; Пайетт, С.; Восе, Р.; Янгблут, Д. Вопрос расхождения: отслеживание недавнего потепления в масштабах полушария с использованием данных о годичных кольцах деревьев. *J. Geophys. Res.* 2007, 112, D17103. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
8. Чжан, И.; Вильямкин, М.; Гоу, Х. Изменение взаимосвязи между ростом деревьев и климатом на северо-западе Китая. *Plant. Ecol.* 2009, 201, 39–50. [\[CrossRef\]](#)
9. Цзяо, Л.; Цзян, И.; Чжан, ВТ; Ван, М.-К.; Чжан, Л.-Н.; Чжао, С.-Д. Расходящиеся реакции на климатические факторы в радиальном росте *Larix sibirica* в восточных горах Тянь-Шаня, северо-запад Китая. *Деревья* 2015, 29, 1673–1686. [\[CrossRef\]](#)

10. Ли, Дж. К.; Ли, Дж. Б.; Ли, Т.; Ау, Т. Ф. Расхождение роста деревьев в зависимости от зимней температуры в горах Гонга, юго-восточный Тибет Плато. *Азиатская география*. 2020, 37, 1–15. [\[CrossRef\]](#)
11. Анчукайтис, К.Дж.; Д'Арриго, Р.Д.; Андреу-Хейлс, Л.; Франк, Ф.; Верстеге, А.; Кертис, А.; Бакли, Б.М.; Джейкоби, Г.С.; Кук, скорая помощь Реконструкция летних температур по годичным кольцам деревьев на северо-западе Северной Америки за последние девять столетий. *J. Clim.* 2013, 26, 3001–3012. [\[CrossRef\]](#)
12. Бюнтген, У.; Рейниг, Ф.; Верстеге, А.; Пьерматтей, А.; Кунц, М.; Крушич, П.; Славин, П.; Штепанек, П.; Торбенсон, М.; дель Кастильо, Э.М.; и др. Недавнее летнее потепление в западном средиземноморском регионе является беспрецедентным со времен Средневековья. *Глоб. Планета. Изменение*. 2024, 232, 104336. [\[CrossRef\]](#)
13. Инь, Х.; Ли, М.-Й.; Хуан, Л. Реконструкция средней летней температуры на основе плотности годичных колец за последние 440 лет на восточном Тибетском нагорье. *Quat. Int.* 2021, 571, 81–88. [\[CrossRef\]](#)
14. Мыглан В.С.; Ойдупаа О.С.; Ваганов Е.А. 2367-летняя древесно-кольцевая хронология для Алтае-Саянского региона (горный массив Монгун-Тайга). *Археол. Этнол. Антропол. Евразия* 2012, 40, 76–83. [\[CrossRef\]](#)
15. Бюнтген, У.; Миглан, В.С.; Лjungkvist, Ф.К.; Маккормик, М.; Ди Космо, Н.; Сигл, М.; Юнгклаус, Дж.; Вагнер, С.; Крушич, П.Дж.; Эспер, Дж.; и др. Похолодание и общественные изменения во время позднеантичного малого ледникового периода с 536 по примерно 660 г. н.э. *Nat. Geosci.* 2016, 9, 231–236. [\[CrossRef\]](#)
16. Чжан, Т.; Юань, И.; Чэнь, Ф.; Юй, Ц.; Чжан, Р.; Цинь, Л.; Цзян, С. Реконструкция гидрологических изменений на основе данных годичных колец деревьев Река Хаба, северо-западный Китай. *J. Arid Land* 2018, 10, 53–67. [\[CrossRef\]](#)
17. Тайник А.В.; Мыглан, В.С.; Баринов В.В.; Ойдупаа, О.К.; Чуракова О.В. Древние лиственницы Республики Тыва, край самые старые деревья в России. *J. Prot. Mt. Areas Res. Manag.* 2023, 15, 13–19. [\[CrossRef\]](#)
18. Панюшкина, И.; Слюсаренко, И.; Быков, Н.; Богданов, Е. Плавающие хронологии колец лиственницы из археологических бревен на Русском Алтае между 800 г. до н.э. и 800 г. н.э. *Радиоуглерод* 2007, 49, 693–702. [\[CrossRef\]](#)
19. Мыглан В.С.; Ойдупаа, О.К.; Кирдянов А.В.; Ваганов Е.А. Древесно-кольцевая хронология 1929 года для Алтае-Саянов. Регион (Западный Тува). *Археол. Этнол. Антрополь. Евразия* 2008, 36, 25–31. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
20. Назаров А.Н., Соломина О.Н., Мыглан В.С. Абсолютный и относительный возраст морен Актру и исторические этапы ледников Центрального Алтая по данным лихенометрии и дендрохронологии // *Лед и снег*. 2022. № 62. С. 387–409.
21. Лоадер, Нью-Джерси; Хелле, Г.; Лос, С.О.; Лемкуль, Ф.; Шлезер, Г.Х. Изменчивость летних температур двадцатого века в южных горах Алтая: исследование изотопов углерода и кислорода в годичных кольцах. *Голоцен* 2010, 20, 1149–1156. [\[CrossRef\]](#)
22. Сидорова О.В.; Заурер М.; Мыглан В.С.; Эйхлер А.; Швиковский М.; Кирдянов А.В.; Брюханова М.В.; Герасимова О.В.; Калугин И.А.; Дарьин А.В. и др. Многопрокси-подход к выявлению современных климатических изменений на территории Российского Алтая. *Климатическая динамика*. 2012, 38, 175–188. [\[CrossRef\]](#)
23. Чэнь, Ф.; Юань, И.; Вэй, В.; Фань, З.; Чжан, Т.; Шан, Х.; Чжан, Р.; Ю, С.; Цзи, Ч.; Цинь, Л. Климатическая реакция ширины кольца и максимальной плотности поздней древесины *Larix sibirica* в горах Алтая выявляет недавние тенденции потепления. *Ann. For. Sci.* 2012, 69, 723–733. [\[CrossRef\]](#)
24. Дуламсурен, К.; Хишигджаргал, М.; Лейшнер, К.; Хаук, М. Реакция ширины годичных колец деревьев на потепление климата и селективное Вырубка лиственничных лесов Монгольского Алтая. *J. Plant Ecol.* 2014, 7, 24–38. [\[CrossRef\]](#)
25. Wu, X.; Liu, H.; He, L.; Qi, Z.; Anenkhonov, O.A.; Korolyuk, A.Y.; Yu, Y.; Guo, D. Измерения годичных колец и инвентаризация лесов задокументировали вызванную климатом динамику лесов в ползасушливых горах Алтая. *Ecol. Indic.* 2014, 36, 231–241. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
26. Каццолла Гатти, Р.; Каллаган, Т.; Величевская, А.; Дудко, А.; Фаббио, Л.; Баттипалья, Г.; Лян, Дж. Ускорение смещения верхней границы леса в горах Алтая в условиях изменения климата в прошлом веке. *Sci. Rep.* 2019, 9, 7678. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
27. Савчук Д.А., Тимошок Е.Е., Филимонова Е.О., Николаева С.А. Динамика верхней границы леса на Катунском хребте (Горный Алтай) за последние 120 лет. *Рус. Ж. Экол.* 2023, 54, 482–487. [\[CrossRef\]](#)
28. Адаменко М.Ф. Динамика роста лиственницы как индикатор термических режимов лета в Горном Алтае // *Региональные географические исследования в Западной Сибири*. Наука: Новосибирск, 1978. С. 20–23.
29. Чжан, Т.; Юань, И.; Ху, И.; Вэй, В.; Шан, Х.; Хуан, Л.; Чжан, Р.; Чэнь, Ф.; Ю, С.; Фань, З.; и др. Изменения температуры в начале лета в южных горах Алтая в Центральной Азии за последние 300 лет. *Quat. Int.* 2015, 358, 68–76. [\[CrossRef\]](#)
30. Чэнь, Ф.; Юань, И. Дж.; Вэй, В. С.; Чжан, Т. В.; Шан, Х. М.; Чжан, Р. Б. Реконструкция осадков для южных Алтайских гор (Китай) по годичным кольцам сибирской ели выявляет недавнюю тенденцию увлажнения. *Dendrochronologia* 2014, 32, 266–272. [\[CrossRef\]](#)
31. Панг, В.; Ли, Ц.; Лю, И.; Сонг, Х.; Сан, Ч.; Ван, Дж.; Янь, И.; Цай, Ц.; Жэнь, М. Изменения осадков в горах Алтая в Китае, обнаруженные по годичным кольцам деревьев, датированным 1615 годом нашей эры. *Леса* 2023, 14, 1496. [\[CrossRef\]](#)
32. Цзян, С.; Чжан, Т.; Юань, И.; Ю, С.; Шан, Х.; Чжан, Р. Реконструкция засухи на основе годичных колец ранней древесины *Picea obovata* Ledeb. для южных Алтайских гор. *Geogr. Ann. A* 2020, 102, 267–286. [\[CrossRef\]](#)
33. Дави, Н.; Джейкоби, Г.; Фанг, К.; Ли, Дж.; Д'Арриго, Р.; Баатарбилег, Н.; Робинсон, Д. Реконструкция изменчивости засухи в Монголии на основе крупномасштабной сети колец деревьев: 1520–1993. *J. Geophys. Res.* 2010, 115, D22103. [\[CrossRef\]](#)
34. Сюй, Г.; Лю, Х.; Цинь, Д.; Чэнь, Т.; Ван, В.; У, Г.; Сан, В.; Ан, В.; Цзэн, Х. Реконструкция относительной влажности для северо-западного Алтайские горы Китая с использованием годичных колец δ 18O. *Chin. Sci. Bull.* 2014, 59, 190–200. [\[CrossRef\]](#)
35. Баринов В.В., Мыглан В.С., Тайник А.В., Ойдупаа О.Ч., Ваганов Е.А. Экстремальные климатические явления в Республике Тыва по данным к анализу годичных колец деревьев. *Современные проблемы экологии*. 2015, 8, 414–422. [\[CrossRef\]](#)

36. Оюнмунхх, Б.; Вейерс, С.; Леффлер, Дж.; Бьямбагерел, С.; Сонинхишиг, Н.; Бюркерт, А.; Генстер-Джордан, С.; Зимме, К. Изменения климата в Южном Алтае и регионе Джунгарского бассейна, Центральная Азия, с 1580 года нашей эры. *Межд. Дж. Климатол.* 2019, 39, 4543–4558. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
37. Эйхлер А.; Оливье, С.; Хендерсон, К.; Лаубе, А.; Бир, Дж.; Папина, Т.; Геггелер, Х.В.; Швиковски, М. Температурная реакция в Алтайском регионе отстает от солнечного воздействия. *Геофиз. Рез. Летт.* 2009, 36, L01808. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
38. Бабич В.В.; Дарьин А.В.; Рудая Н.А.; Маркович Т.И. Два тысячелетия климатической истории Русского Алтая: комплексная реконструкция по данным озерных осадков. *Геол. и геофиз.* 2023, 64, 1217–1226. [\[CrossRef\]](#)
39. Бляхарчук, ТА; Райт, Х.Е.; Бородавка, П.С.; ван дер Кнаап, У.О.; Амманн, Б. Изменения растительности в позднем ледниковом и голоценовом периоде на высокогорном плато Улаган, Алтайские горы, южная Сибирь. *Палеогеография. Палеоклиматология. Палеоэкология.* 2004, 209, 259–279. [\[CrossRef\]](#)
40. Хуан, Х.; Пэн, W.; Рудая, Н.; Гримм, ЕС; Чэнь, Х.; Цао, Х.; Чжан, J.; Пань, Х.; Лю, S.; Чэнь, С.; и др. Голоценовая растительность и динамика климата в горах Алтая и прилегающих районах. *Geophys. Res. Lett.* 2018, 45, 6628–6636. [\[CrossRef\]](#)
41. Шлютц, Ф.; Лемкюль, Ф. Климатические изменения на Русском Алтае, юг Сибири, на основе палинологических и геоморфологических результатов, с учетом климатических телесвязей и истории человечества со среднего голоцена. *Veget. Hist. Archaeobot.* 2007, 16, 101–118. [\[CrossRef\]](#)
42. Рао, З.; Го, Х.; Цао, Дж.; Ши, Ф.; Цзя, Г.; Ли, И.; Чэнь, Ф. Последовательная долгосрочная тенденция потепления в голоцене на разных высотах в горах Алтая в засушливой Центральной Азии. *J. Quat. Sci.* 2020, 35, 1036–1045. [\[CrossRef\]](#)
43. Останин О.В., Михайлов Н.Н. Современные изменения высокогорных геосистем (на примере Центрального и Юго-Восточного Алтая) // Алтай. Государственный университет: Барнаул, Россия, 2013; 171с.
44. Швайнгрубер, Ф.Х. Древесные кольца: основы и приложения дендрохронологии; Издательство Kluwer Academic: Dordrecht, The Нидерланды; Бостон, Массачусетс, США, 1988; 276 стр.
45. Холмс, Р. Л. Компьютерный контроль качества при датировании и измерении годовичных колец. *Tree-Ring Bull.* 1983, 44, 69–75.
46. Кук, скорая помощь; Кайрюкстис, Л.А. Методы дендрохронологии: применение в науках об окружающей среде; Ключер: Дордрехт, The Нидерланды, 1990; стр. 104–122.
47. Кук, Э. Р.; Питерс, К. Расчет несмещенных индексов годовичных колец для изучения климатических и экологических изменений. *Голоцен* 1997, 7, 361–370. [\[CrossRef\]](#)
48. Уигли, Т.М.Л.; Бриффа, К.Р.; Джонс, П.Д. О среднем значении коррелированных временных рядов с приложениями в дендроклиматологии и гидрометеорология. *J. Clim. Appl. Meteorol.* 1984, 23, 201–213. [\[CrossRef\]](#)
49. Харрис, И.; Осборн, Т.Дж.; Джонс, П.; Листер, Д. Версия 4 ежемесячного набора многомерных климатических данных с высоким разрешением в сетке CRU TS. *Научные данные* 2020, 7, 109. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
50. Галахов В.П.; Мухаметов Р.М. Ледники Алтая; Наука: Новосибирск, Россия, 1999; 136 с.
51. Кинг, ГМ; Гугерли, Ф.; Фонти, П.; Франк, Д. Реакция роста деревьев вдоль градиента высоты: климат или генетика? *Экология* 2013, 173, 1587–1600. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
52. Moser, L.; Fonti, P.; Büntgen, U.; Esper, J.; Luterbacher, J.; Franzen, J.; Frank, D. Сроки и продолжительность вегетационного периода лиственницы европейской вдоль высотных градиентов в Швейцарских Альпах. *Tree Physiol.* 2010, 30, 225–233. [\[CrossRef\]](#)
53. Сугимото, А.; Янагисава, Н.; Наито, Д.; Фудзита, Н.; Максимов, Т.С. Значение вечной мерзлоты как источника воды для растений в восточносибирской тайге. *Ecol. Res.* 2002, 17, 493–503. [\[CrossRef\]](#)
54. Ваганов Е.А., Шиатов С.Г., Мазепа В.С. Дендроклиматические исследования в Урало-Сибирской Субарктике // Наука: Новосибирск, Россия. 1996; 246с. (на русском языке)
55. Кирдянов А.В., Прокушкин А.С., Табакова М.А. Годичный прирост лиственницы Гмелина в контрастных локальных условиях север Средней Сибири. *Дендрохронология* 2013, 31, 114–119. [\[CrossRef\]](#)
56. Кирдянов, АВ; Заурер, М.; Арзак, А.; Кнорре, А.А.; Прокушкин, АС; Чуракова, ОВ; Арозио, Т.; Бебчук, Т.; Зигвольф, Р.; Бюнтген, У. Таяние вечной мерзлоты может смягчить вызванный потеплением стресс от засухи у деревьев бореальных лесов. *Sci. Total Environ.* 2024, 912, 168858. [\[CrossRef\]](#)
57. Петров И.А.; Харук, В.И.; Голюков А.С.; Я, СТ; Ондар, СО; Шушпанов А.С. Реакция сосны и лиственницы сибирской на потепление. сухой климат на южной границе их ареала. *Леса* 2024, 15, 1054. [\[CrossRef\]](#)
58. Овчинников Д.В., Панюшкина И.П., Адаменко М.Ф. Тысячелетняя древесно-кольцевая хронология лиственницы Алтайской возвышенности и ее использование для реконструкции летней температуры. *Геогр. и прир. ресурсы.* 2002, 1, 102–108.
59. Тайник А.В.; Баринов В.В.; Ойдупаа, ОК; Мыглан, В.С.; Рейниг, Ф.; Бюнтген, У. Согласованность роста и чувствительность климата *Larix sibirica* на верхней границе леса в российских Алтае-Саянских горах. *Дендрохронология* 2016, 39, 10–16. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
60. Davi, NK; Rao, MP; Wilson, R.; Andreu-Hayles, L.; Oelkers, R.; D'Arrigo, R.; Nachin, B.; Buckley, B.; Pederson, N.; Leland, C.; et al. Ускоренное недавнее потепление и изменчивость температуры за последние восемь столетий в Центрально-Азиатском Алтае по интенсивности синего цвета в кольцах деревьев. *Geophys. Res. Lett.* 2021, 48, e2021GL092933. [\[CrossRef\]](#)
61. Парк, В.К.; Телевски, Ф. Измерение максимальной плотности поздней древесины с помощью анализа изображений на клеточном уровне. *Wood Fiber Sci.* 1993, 25, 326–332.
62. Швайнгрубер, Ф. Х.; Бриффа, К. Р.; Ноглер, П. Денситометрический трансект годовичных колец от Аляски до Лабрадора: сравнение хронологий ширины колец и максимальной поздней плотности древесины в хвойном поясе северной части Северной Америки. *Int. J. Biometeorol.* 1993, 37, 151–169. [\[Перекрестная ссылка\]](#)

63. Уилсон, Р. Дж. С.; Лакман, Б. Х. Дендроклиматическая реконструкция максимальных летних температур на участках верхней границы леса в внутренней Британская Колумбия. Голоцен 2003, 13, 853–863. [\[CrossRef\]](#)
64. Эспер, Дж.; Крушич, П.; Юнгквист, Ф.; Лютербахер, Дж.; Каррер, М.; Кук, Э.; Дави, Северная Каролина; Хартл-Мейер, К.; Кирдянов А.; Контер, О.; и др. Рейтинг температурных реконструкций прошлого тысячелетия на основе годовых колец деревьев. Quat. Sci. Rev. 2016, 145, 134–151. [\[CrossRef\]](#)
65. Бьёрклунд, Дж.; фон Аркс, Г.; Нивергельт, Д.; Вильсон, Р.; Ван ден Булке, Дж.; Гюнтер, Б.; Лоадер, Н. Дж.; Рыввал, М.; Фонтти, П.; Шарнвебер, Т.; и др. Научные достоинства и аналитические проблемы денситометрии годовых колец деревьев. Rev. Geophys. 2019, 57, 1224–1264. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
66. Бьёрклунд Дж.; Сефтиген, К.; Стоффель, М.; Фонтти, М.В.; Коттлоу, С.; Фрэнк, округ Колумбия; Эспер, Дж.; Фонтти, П.; Гусс, Х.; Грудд, Х.; и др. Фенноскандинавская анатомия годовых колец показывает более теплый современный климат, чем средневековый. Nature 2023, 620, 97–103. [\[CrossRef\]](#)
67. Силкин, П.П.; Кирдянов А.В.; Крушич, П.Дж.; Екимов М.В.; Баринов В.В.; Бюнтген, У. Новый подход к измерению плотности годовых колец параметры. Журнал биологии Сибирского федерального университета 2022, 15, 441–455.
68. Рюдвал, М.; Бьёрклунд, Й.; фон Аркс, Г.; Бегович, К.; Лекса, М.; Ногеира, Дж.; Шурман, Дж. С.; Цзян, И. Сверхвысокое разрешение Визуализация в отраженном свете для дендрохронологии. Dendrochronologia 2024, 83, 126160. [\[CrossRef\]](#)
69. Швайнгрубер, Ф. Х. Годичные кольца деревьев и окружающая среда. Дендрозкология; Наурт: Берн, Швейцария, 1996; 609 с.
70. Кирдянов А.В., Ваганов Е.А., Хьюз М.К. Разделение климатического сигнала по ширине годового кольца и максимальной поздней древесине Плотность записей. Деревья 2007, 21, 37–44. [\[CrossRef\]](#)
71. Крамер, П.Дж.; Козловский, Т.Т. Физиология древесных растений; Академическая пресса: Нью-Йорк, штат Нью-Йорк, США; Сан-Франциско, Калифорния, США; Лондон, Великобритания, 1979; 811 стр.
72. Ваганов, Е.А.; Хьюз, М.К.; Шашкин, А.В. Динамика роста годовых колец хвойных деревьев: образы прошлой и будущей среды (Экологические исследования, т. 183); Springer Science & Business Media: Берлин, Германия, 2006; 356 с.
73. Кук, Э.Р.; Эспер, Дж.; Д'Арриго, Р. Изменчивость температуры суши вне тропического Северного полушария за последние 1000 лет. Quat. Sci. Rev. 2004, 23, 2063–2074. [\[CrossRef\]](#)
74. Кирдянов А.В.; Крушич, П.Дж.; Шишов В.В.; Ваганов Е.А.; Фертиков А.И.; Мыглан, В.С.; Баринов В.В.; Обзор, Дж.; Эспер, Дж.; Ильин, В.А.; и др. Экологические и концептуальные последствия загрязнения Арктики. Экол. Летт. 2020, 23, 1827–1837. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
75. Ункельбах, Дж.; Дуламсурэн, К.; Белинг, Х. Климат позднего голоцена и история землепользования в горах Монгольского Алтая: объединенные данные палинологического, макроугольного и древесно-кольцевого анализов. Деревья для людей 2021, 4, 100073. [\[CrossRef\]](#)
76. Сян, Л.; Хуан, Х.; Сан, М.; Паниццо, В. Н.; Хуан, Ч.; Чжэн, М.; Чэнь, Х.; Чэнь, Ф. Доисторическая экспансия населения в Центральной Азии Азия продвигается Алтайским голоценовым климатическим оптимумом. Nat. Commun. 2023, 14, 3102. [\[CrossRef\]](#)

Отказ от ответственности/Примечание издателя: заявления, мнения и данные, содержащиеся во всех публикациях, принадлежат исключительно отдельным авторам и соавторам, а не MDPI и/или редакторам. MDPI и/или редакторы отказываются от ответственности за любой вред, причиненный людям или имуществу в результате использования любых идей, методов, инструкций или продуктов, упомянутых в содержании.