

1 Пространственно-временные изменения температурной чувствительности сибирского дерева

2 рост

3

4 Кирдянов Александр Владимирович^{1,2,3}, Альберто Арзак³, Прокушкин Анатолий Сергеевич^{2,3}, Овчинников Дмитрий Владимирович² 5 Бондарев Александр Владимирович² Силкин Павел Петрович⁴ Татьяна Бебчук¹ Ян Эспер^{5,6}, Ульф Бюнтген^{1,6,7}

6

7 1 Кафедра географии, Кембриджский университет, CB2 3EN, Великобритания

8 ²Сукачева СО РАН, Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр СО»

9 РАН, Академгородок, Красноярск, 660036, Российская Федерация

10 ³Сибирский федеральный университет, 660041, г. Красноярск, Свободный, 79, Российская Федерация

11 ⁴Институт географии РАН, Старомонетный переулок, 29, Москва, 119017, Российская Федерация

12 5Географический факультет Университета Иоганна Гутенберга, 55099, Майнц, Германия

13 6Центр исследования глобальных изменений, 61300 Брно, Чехия

14 7Географический факультет Масариковского университета, 61137 Брно, Чехия

15

16 * Автор для переписки: ak2118@cam.ac.uk (Кирдянов Александр Владимирович)

17

18

19

20

21

22

23

24

25

26

27

28 Аннотация

29 Антропогенное изменение климата в значительной степени влияет на функционирование растительности.

30 сообществ по всему миру. В крупнейшем в мире наземном биоме — бореальном лесу — постоянное

В последние десятилетия было зафиксировано отсутствие связи между ростом деревьев и повышением летних температур .

32 Эта так называемая «Проблема дивергенции» (ДП) изучалась на протяжении последних 30 лет, однако причины

33 и пространственные закономерности в зоне бореальных лесов недостаточно изучены. Здесь мы представляем дерево-

34 кольцевых доказательства различной DP у *Larix gmelinii* с самого северного лесного острова в мире.

35 Полуостров Таймыр и *Larix sibirica* из южной тайги Центральной Сибири. Ширина годичного кольца

36 и данные о максимальной плотности поздней древесины показывают, что DP существенно выше на юге, что указывает на

37 что взаимосвязь между ростом и климатом лиственницы сибирской вышла за пределы переломного момента при более теплом климате.

38 климат и повышенная антропогенная нагрузка. На севере температура оставалась сильной и

39 стабильны во времени, что подчеркивает умение составлять хронологию годичных колец для долгосрочного климата.

40 реконструкций. Эти результаты подчеркивают региональную неоднородность реакции роста деревьев на

41 глобальное потепление в зоне бореальных лесов, что приводит к пространственно меняющимся последствиям для

Следует ожидать динамики углеродного и водного цикла . Наше исследование подчеркивает важность

43 обновление хронологии годичных колец в отдаленных регионах бореальной лесной зоны для содействия пониманию

44 пространственно-временных закономерностей распределения биомассы, деградации вечной мерзлоты и DP на этом большом

45 биом.

47

48

49

50

51

52

53 Ключевые слова: арктическое затемнение; Бореальные леса; Дендроклиматология; Проблема дивергенции (ДП);

54 Глобальное потепление; Пространственно-временная неоднородность

55 Введение

56 Постоянно возрастающая антропогенная деятельность вызывает локальные и глобальные экологические и климатические изменения.

57 изменений, которые в значительной степени влияют на функционирование экосистем во всем мире с многочисленными последствиями

58 для наземной растительности (Newbold et al., 2015; Piao et al., 2020; Weiskopf et al. 2020).

59 Исключительно уязвимые бореальные леса в настоящее время испытывают беспрецедентные темпы

60 потепления и увеличение частоты экстремальных погодных явлений, интенсивность лесных пожаров, темпы распространения вечной мерзлоты

61 деградация, масштабы лесозаготовок и техногенных выбросов и т.д. (Готье и др., 2015; Пономарев

62 и др., 2016, 2023; Бокс и др., 2019; Харук и др., 2021; Анисимов и Ренева 2006; Анисимов и др.

63 др., 2007; Холлоуэй и Левкович, 2020, Кирпотин и др., 2021). Влияние всех этих факторов

64 и процессы уже можно наблюдать в современном состоянии различных компонентов бореальной

65 лесных экосистем, включая деревья (Тей и др., 2017).

66 Радиальный прирост деревьев в циркумполярном высокоширотном лесном поясе северного полушария составил

67, как показано, предположительно ограничивается изменчивостью температуры (Джакоби, Д'Арриго, 1989; Ваганов

68 и др., 1996, 1999; Дави и др., 2003; Бриффа и др., 2004; Анчукайтис и др., 2017; Бьорклунд и др.,

69 2023 г.). Однако в последние десятилетия разделение роста деревьев в этих экосистемах с ростом

70 инструментальных летних температур, так называемая «Проблема дивергенции» (DP) (Д'Арриго и др.,

71, 2008), наблюдался в высокочастотной или низкочастотной области, или в обеих. ДП ставит под сомнение способность

72 северных лесов для повышения продуктивности биомассы после нынешнего потепления. Если ДП

73 становится широко распространенным явлением, это также будет иметь большое значение для способности определять годовичные кольца.

74 данных, которые могут служить показателем температуры в прошлые теплые периоды (Büntgen et al., 2021a) и

75 предсказывают будущую реакцию роста лесов на повышение температуры (Camarero et al., 2021).

76 Впервые о DP сообщили Джейкоби и Д'Арриго (1995) для белой ели на Аляске, а позднее

77 описано для различных участков и пород деревьев, в основном в высоких широтах и на больших высотах.

78 экосистем (обзор см. в D'Arrigo et al., 2008). Доказательства ДП как широко распространенного

79 явлений в циркумполярных лесах высоких широт были получены на основе анализа роста деревьев.

80 региональных композитов в северном полушарии (Briffa et al., 1998; Wilson et al. 2007). ДП был

81 также обнаружен в нескольких высокогорных лесах более низких широт (Zhang et al., 2009; Jiao et al., 2015;

82 Ли и др., 2020). Однако некоторые исследования, проведенные с тех пор, показали, что ДП наблюдается не во всех случаях.

83 места с ограниченной температурой, что означает, что ДП представляет собой пространственно неоднородное явление.

84 (Анчукайтис и др., 2013, 2017; Бюнтген и др., 2021а, 2024; Инь и др., 2021).

85 Потенциальные причины ДП подробно описаны D'Arrigo et al. (2008), и они включают в себя

86 ряд биологических и экологических проблем: усиление ограничивающего воздействия засухи на рост деревьев.

87 , который преодолевает влияние температуры, нелинейная реакция радиального роста дерева на подъем

88 температура при изменении окружающей среды, изменения концентрации стратосферного озона.

89 Выбор правильной целевой температурной переменной также был связан с возникновением ДП.

90 зависимость возникновения ДП от методологических ошибок, связанных с древесно-кольцевой хронологией.

91 качество и применимость инструментальных измерений температуры были

92, рассмотрено Эспером и Франком (2009) и Франком и др. (2007). В последнее время роль промышленного

93 Загрязнение окружающей среды и арктическое затемнение как основной фактор ДП в некоторых регионах были рассмотрены в

94 протяженная часть высокоширотного бореального лесного пояса Сибири (Кирдянов и др., 2020; Бюнтген

95 и др., 2021б). Однако нынешнее понимание масштабов и причин ДП, а также

Последствия этого явления еще далеки от завершения .

97 Здесь мы анализируем данные о ширине годовых колец (TRW) и максимальной плотности поздней древесины (MXD) из

98 двух удаленных по широте лесных регионов в Центральной Сибири, чтобы проверить рост деревьев на предмет потери чувствительности.

99 до температуры в условиях постепенного потепления климата и увеличения антропогенной нагрузки. Мы

100 определяют сроки и масштабы ДП в этих экологически различных средах и обсуждают

101 полученные результаты относительно возможных причин и последствий ДП.

102

103 Материалы и методы

104 Образцы древесины были собраны в двух растительных зонах бореальных лесов Центральной Сибири с

Климатические условия существенно различаются: лесотундровый экотон и южная тайга (рис. 1).

106 Климат в районе исследований характеризуется как резко континентальный, с низкими среднегодовыми показателями.

107 температур $-12,5^{\circ}\text{C}$ в северном регионе (ВМО 20891 «Хатанга»; 1929–2022 гг.) контрастные.

На 108 гораздо теплее, но все еще отрицательная среднегодовая температура $-1,7^{\circ}\text{C}$ в южном регионе.

109 (ВМО 29263 «Енисейск»; 1871–2022 гг. и $-1,3^{\circ}\text{C}$ в течение 1929–2022 гг.). Самый теплый и самый холодный

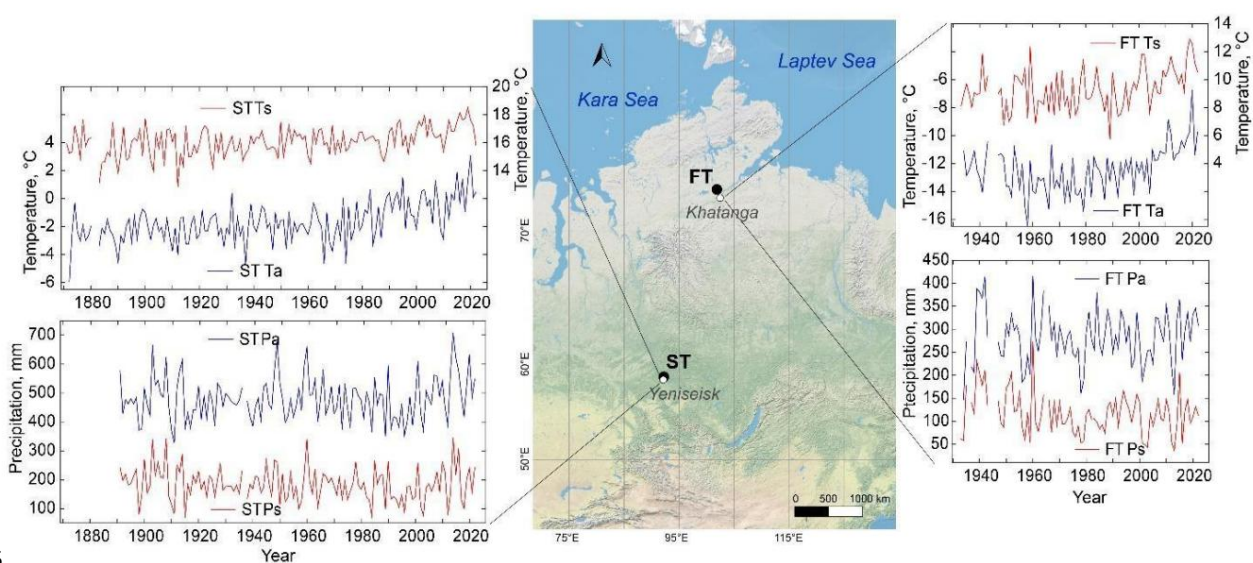
110 месяцев в обоих регионах — это июль и январь с месячными температурами $12,6^{\circ}\text{C}$ и $-32,1^{\circ}\text{C}$ в

111 лесотажные и $18,3^{\circ}\text{C}$ и $-21,9^{\circ}\text{C}$ в южной тайге ($18,5^{\circ}\text{C}$ и $-21,5^{\circ}\text{C}$ за 1929–2022 гг.),

112 соответственно. Годовые суммы осадков составляют около 280 мм в лесотундре и около 480 мм,

113 из них 42% и 38% приходится на летние месяцы (с июня по август) соответственно.

114114



115
116 Рис. 1. Объекты исследования и климатические данные. На карте показано расположение мест годичных колец (черные кружки).

117 и метеостанции (белые кружки). На диаграммах показаны летние (красные) и среднегодовые значения.

118 (синие) температуры и осадков зафиксированы на Хатангском и Енисейском метеостанциях.

119 станций рядом с FT для мест деревьев ST.

120120

121 Впервые в лесотундровом регионе были определены летние (июнь–август) и годовые средние температуры.

122 относительно стабильны или незначительно снижаются с 1929 по 1989 год со скоростью $-0,04$ ($P > 0,05$) и $-0,20$.

123 $^{\circ}\text{C}/\text{десятилетие}$ ($P > 0,05$) соответственно (рис. 1). С 1990 года температура повышается на $0,86$,

124 и $1,01^{\circ}\text{C}/\text{десятилетие}$ летом и ежегодно соответственно ($P < 0,005$). В южной тайге сезонно.

125 средних значений температуры продемонстрировали повышение с 1871 по 1969 год на $0,05^{\circ}\text{C}/\text{десятилетие}$ ($P > 0,05$) в

126 летом и ежегодно, причем рост ускорился с 1970 г. до $0,31$ и $0,51^{\circ}\text{C}/\text{десятилетие}$ ($P <$

127 0,0001) для средних летних и годовых температур соответственно. 1 ^{ул.} автокорреляция порядка

128 коэффициентов для летней температуры составляют 0,26 и 0,23 для лесотундры и южной тайги,

129 соответственно, но для температуры мая-августа в южной тайге она увеличивается до 0,31. Годовой и

130 сезонных сумм осадков как в лесотундре, так и в южной тайге статистически не отражены.

131 значимое изменение ($P > 0,01$).

132 Доминирующей породой деревьев на севере Центральной Сибири является *Larix gmelinii* (Rupr.) Rupr.

133 (Толмачев 1931; Абаимов и др., 1997). На юге лиственница представлена *Larix sibirica* Ledeb.

134 В 2010–2011 гг. мы собрали керны древесины на двух участках в лесотундре (FT1 и FT2, 72,5° с.ш. и

135 102,0° в.д.) и один участок в южной тайге (ST, 58,5° с.ш. и 92,0° в.д.) (таблица) для обозначения разных деревьев

136 условия роста *Larix* spp. в средней Сибири. Расстояние между регионами > 1600

137 км, а площадки ФТ были созданы на самом северном в мире лесном острове Ары-Мас.

138 характеризуется суровым климатом, условия на СТ более мягкие (рис. 1). Деревянные сердечники из них

На 139 площадках были измерены профили плотности годовых колец и получены данные MXD по данным

140 стандартных процедур (Schweingruber, 1988). Чтобы обновить хронологию годовых колец, дополнительно

В 2019 году в лесотаяжном регионе создан 141 дендрохронологический участок вблизи существующего

В 2022 г. повторно посещено 142 пробные площадки, а также южнотаяжный участок. Древесный материал 2019 г.

143 и 2022 использовались для измерения ширины годовых колец (TRW) в измерительной системе LINTAB.

144 (RINTECH еК, Гейдельберг, Германия). Полученные отдельные серии перекрестно датировались с помощью

145 победа в TSAP (Ринн, 2003). Перекрестное датирование было статистически проверено с помощью COFECHA (версия

146 6.02П; <http://www.ldeo.columbia.edu/tree-ring-laboratory/resources/software>).

147 Отдельные серии TRW были стандартизированы с помощью отрицательной экспоненциальной линии с использованием

148 Программное обеспечение APCAT (<https://www.geog.cam.ac.uk/research/projects/dendrosoftware/>, последнее обращение

149 от 14.02.2024). Для серии MXD кубические сглаживающие сплайны с срезом частотной характеристики 50 % при

Было использовано 150 2/3 длины отдельной серии. Двухвесовые надежные средства индивидуального

Для создания безразмерной индексной хронологии была использована 151 серия измерений. Стандартная версия

Для большинства дальнейших анализов было выбрано 152 хронологии. Остаточная версия была только

153 используется для корреляции с месячными суммами и суммами осадков, которые не отражают статистически
154 значимые тенденции. Для лесотундрового региона мы разработали три местных TRW и два MXD.
155 хронологий, имеющих разную глубину выборки (таблица) и высокодостоверно коррелирующих
156 (по крайней мере $P < 0,001$). Чтобы избежать переоценки влияния сайта с более высокой выборкой
157 репликаций мы сначала разрабатывали локальные хронологии индивидуально, а затем усредняли локальный индекс
158 хронологий в региональных хронологиях для FT. В южной тайге параметр годовых колец
По объединенному материалу двух полевых кампаний получено 159 хронологий. Оценить
160 качества хронологий рассчитывалась их стандартная дендрохронологическая статистика:
161 коэффициент чувствительности, $1 - \text{усл.}$ коэффициент корреляции порядка и выраженный популяционный сигнал (EPS).
162 Для оценки чувствительности климата хронологий TRW и MXD использовалась корреляция Пирсона.
163 коэффициента были рассчитаны по среднемесячным значениям температуры и суммам осадков из
164 ближайших метеостанции (рис. 1) с сентября прошлого года по сентябрь текущего
165 год. Температуры июня – июля (JJ) и лета (JJA), а также общее количество осадков летом.
166 и сезон со среднемесячной температурой ниже 0°C (w) использовались для оценки сезонности.
167 климатических влияний. Для холодного сезона суммы осадков рассчитывались по предыдущим
168 сентября по май текущего года в лесотундре и с октября прошлого года по апрель текущего года
169 в южной тайге. Оценить временную устойчивость связей между древесно-кольцевыми хронологиями.
170 и климатических данных, мы использовали текущие корреляции, рассчитанные для 31-летнего окна с одно-
Шаг 171 год. Для этого мы использовали температурные показатели не менее двух теплых месяцев (включая май в
172 южная тайга) как переменные, наиболее коррелирующие с данными по годовым кольцам. Наконец, пространственная корреляция
173 между хронологиями MXD и средними значениями сезонной температуры на сетке (CRU TS4.07, Harris et
174 др., 2020) рассчитаны для первого и последнего ~40-летних длительных периодов имеющих инструментальных
175 измерений температуры с ближайших метеорологических станций, покрытых данными MXD. В
176 лесотундры мы немного увеличили окно пространственных корреляций до 41 и 42.
177 лет, чтобы охватить весь период метеорологических наблюдений в Хатанге. Представление пространственных
178 корреляций за тот же период, начиная с 1901 г., для двух изученных памятников недостоверны из-за

179 отсутствие достоверных данных о температуре в лесотундре, которые правильно отражают условия.

180 до установки метеостанции в Хатанге.

181181

182 результатов

183 Региональные хронологии TRW и MXD по лесотундре (FT) непрерывно охватывают прошлое

184 438 лет (1582 – 2019 г.) и 304 года (1708 – 2011 гг.) соответственно (табл., рис. 2). TRW и

185 хронологий MXD из южной тайги (ST) охватывают последние 311 лет (1711–2021 гг.) и

186 240 лет (1770 – 2009) соответственно. Средний TRW в лесотундре варьируется в широких пределах.

187 от $0,26 \pm 0,19$ мм до $0,44 \pm 0,25$ мм, причем более низкие значения отмечены для старых деревьев и

188 хронология с большей средней длиной сегмента (MSL). Деревья в южной тайге растут быстрее (в среднем

189 $TRW > 1,00$ мм) с более плотным MXD ($> 1,00$ г/см³) по сравнению с лесотундрой. Коэффициент

190 чувствительность высока в хронологиях индекса TRW в лесотундре ($>0,300$) и ниже в южных регионах.

191 тайга (0,218). Хронологии MXD характеризуются еще более низкой средней чувствительностью. Выраженный

192 Демографический сигнал (рассчитанный на 50-летние периоды) выше общепринятого

193 порог 0,85, по крайней мере, с 1867 года для всех хронологий индекса TRW (Wigley et al., 1984). Эти

194 статистики и высокие коэффициенты корреляции между местными хронологиями годовичных колец ($P < 0,005$) показывают

195 что объединенные региональные хронологии FT в лесотундре и локальные хронологии ST в южных регионах.

Для дендроклиматического анализа пригодны 196 тайг.

197 Индексы TRW от FT демонстрируют четкую тенденцию к росту с конца 1990-х годов, что

198 следует за спадом TRW после пика в 1940-х годах (рис. 2A). В южной тайге TRW

199 продемонстрировали рост по сравнению с 1949 годом, но со значительным падением в 2013-2016 годах и последующих

200 самых высоких значений в 2020 и 2021 годах (рис. 2B). В целом индексы MXD были относительно стабильными в

201 лесотундра с 1930-х годов, но с небольшим снижением в 1990-е годы и последующим восстановлением (рис.

202 2Б). В южной тайге показатели MXD снижались с 1910-х по начало 1980-х годов, затем увеличивались.

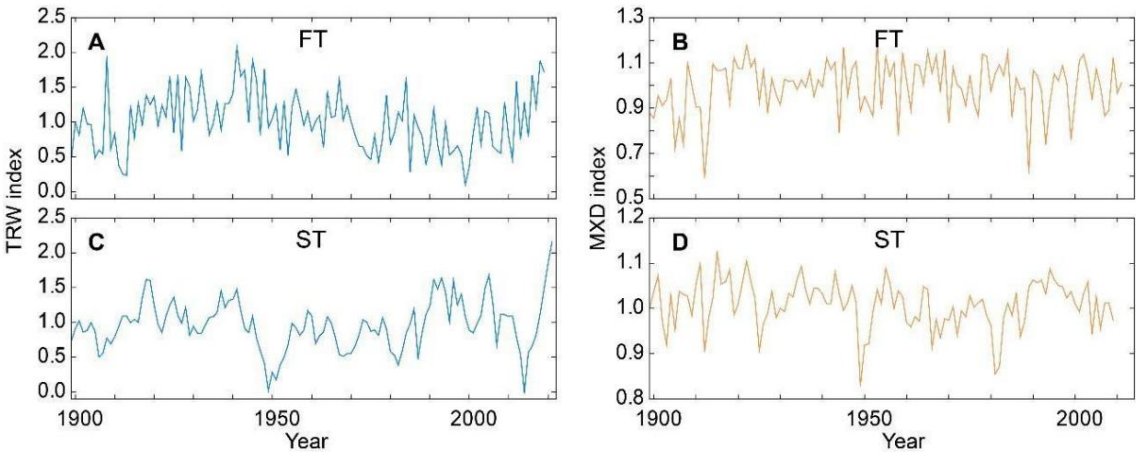
203 в 1990-е годы и снизился после середины 1990-х годов.

204204

205 Табл. Хронологические характеристики (TRW = ширина годичного кольца, MXD = максимальная плотность поздней древесины, MSL = средняя длина сегмента, Rbar = межсерийная корреляция, 1^{ул.} автокорреляция порядка была
206 рассчитано за период наличия данных о температуре с ближайших метеостанций
207 Хатанга и Енисейск)

Область	Сайт	Кольцо дерева	N из	Период, лет	MSL	Средняя ± стандартное отклонение	Иметь в виду	1 ^{ул.} заказ
		параметр	ряд				чувствительность	автокорреляция
Тундра	FT1	TPB	14	1708 – 2010 гг.	125	0,42 ± 0,28 мм	0,48	0,46
	FT2	TPB	14	1924 – 2011 гг.	74	0,44 ± 0,25 мм	0,32	
	FT3	TPB	41	1582 – 2019 г.	217	0,26 ± 0,19 мм	0,58	
	FT1	MXD	14	1708 – 2010 гг.	125	0,85 ± 0,13 г/см3	0,16	0,36
	FT2	MXD	14	1924 – 2011 гг.	74	0,79 ± 0,11 г/см3	0,12	
Южный СТ		TPB	24	1711 – 2021 гг.	131	1,05 ± 0,54 мм	0,22	0,64
тайга	СТ	MXD	15	1770 – 2009 г.	126	1,01 ± 0,10 г/см3	0,05	0,37

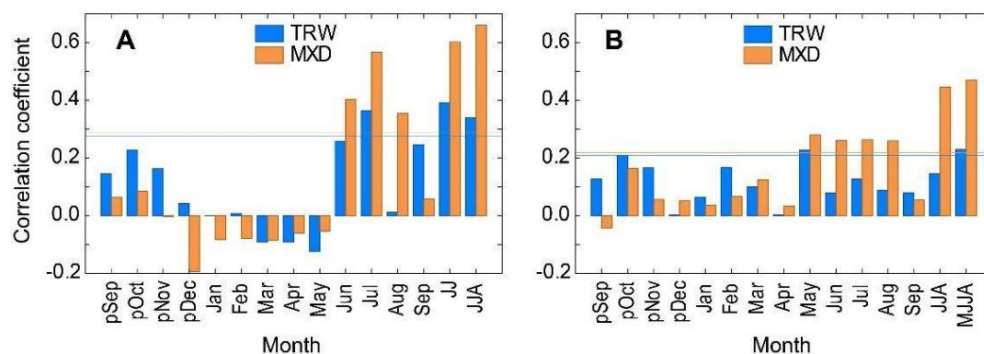
209
210



211
212 Рис. 2. Стандартные хронологии ширины годичных колец (А, В) и максимальной густоты (Б, Г) для лесо-
213 участков тундры (FT) и южной тайги (ST)
214
215 Анализ реакции роста на климат в региональных хронологиях лесотундры с тех пор.

216 1929 показывает, что индексы TRW достоверно положительно коррелируют со средними температурами июля ($P < 0,01$) (рис. 3А). Однако MXD демонстрирует более высокие корреляции и для более длительного летнего периода.
217 с июня по август. Обе хронологии FT положительно коррелируют с летней сезонностью (июнь–
218 июль и июль–август) средние температуры (до $r = 0,66$, $P < 0,01$ для MXD и летних

температура 220). TRW на ST достоверно коррелирует только с температурой мая и мая-августа (r
 221 $= 0,23$, $P < 0,01$) (рис. 3Б). Напротив, MXD показывает сильную зависимость от месячных и
 222 средних значения сезонной температуры с наибольшей корреляцией со средними значениями температуры JJA и MJJA.
 223 (до $r = 0,47$, $P < 0,01$). Зависимость параметров годовых колец от осадков в целом имеет вид.
 224 слабее (не показано). Корреляции остаточных хронологий FT ни с ежемесячными, ни с
 225 сезонными суммами осадков статистически значимы ($P > 0,01$). В южной тайге TRW также
 226 не показывает статистически значимой связи с осадками, но MXD отрицательно коррелирует.
 227 с июльскими и летними суммами осадков ($r = -0,32$ и $-0,36$, $P < 0,01$ соответственно).
 228228



229229
 230 Рис. 3. Климатические сигналы. Коэффициенты корреляции стандартных хронологий TRW и MXD
 231 с месячными и сезонными средними температурами с сентября прошлого года по сентябрь текущего года.
 232 кольцевая формация на участках лесотундры (А) и южной тайги (Б). Сезонные средние значения были
 233 рассчитано на июнь-июль (JJ), лето (JJA) и май-август (MJJA). Две горизонтальные линии
 234 указывают уровень значимости $P < 0,01$ для TRW и MXD.
 235235

236 Текущая корреляция хронологии индекса MXD по данным FT со средними значениями летней температуры.
 237 высокие и достигают $r = 0,71$ и $0,72$ ($P < 0,001$) для летних и июль-августовских температур,
 238 соответственно (рис. 4А). Корреляции со средней температурой первых двух летних месяцев
 239 (JJ) немного ниже (среднее значение $r = 0,63$, $P < 0,001$). Временная стабильность температурного сигнала в
 240 MXD подтверждается обширным пространственным охватом сильных полевых корреляций с летними данными с привязкой к сетке.
 241 средние значения температуры за два длительных 40-летних периода (рис. 4Б,В). За первые четыре десятилетия
 242 имеющиеся данные MXD в лесотундре с 1929 по 1969 г., корреляции $r > 0,4$ ($P < 0,01$)

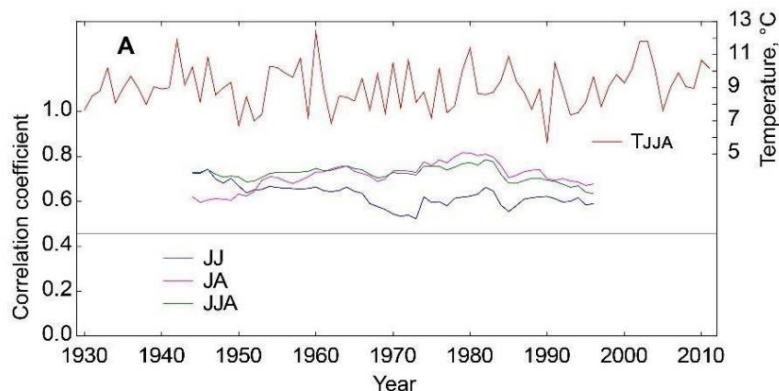
243 достигают 60° с.ш. на юге и распространяются между Обской губой (Обской губой) на северо-западе и

244 Дельта Лены на северо-востоке (рис. 4Б). За период 1970–2011 гг. площадь, покрытая

245 статистически значимы (корреляции хронологии FT несколько снизились на западе, но

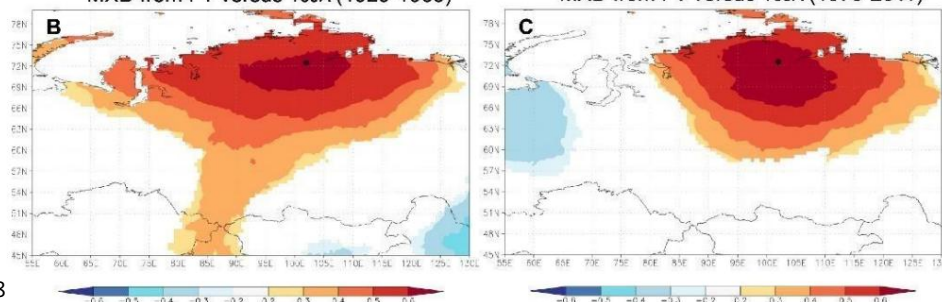
246 область с наивысшими корреляциями $r > 0,6$ увеличивалась в направлении с севера на юг (рис. 4В).

247247



MXD from FT versus TJJJ (1929-1969)

MXD from FT versus TJJJ (1970-2011)



248

249 Рис. 4. Средние значения температуры JJJ в Хатанге (красный цвет) с корреляциями 31-летнего окна.

250 между стандартной хронологией максимальной плотности поздней древесины (MXD) и летним месяцем.

251 средние температурные значения на лесотундровом участке ФТ (А). Соответствующие корреляционные поля с 1929 г. –

252 1969 г. (Б) и 1970–2011 гг. (В). Горизонтальная линия указывает уровень значимости $P < 0,01$.

253253

254 Текущие корреляции MXD от ST со средними значениями летней температуры и температуры MJJA:

255 в целом высок в течение первых десятилетий 20-го века и влияние трехмесячных и

256 Среднее значение температуры MJJA оставалось статистически значимым ($P < 0,01$) до 1933 г. (r рассчитано для

257 1918 – 1948 гг.) (рис. 5А). Зависимость MXD от MJ и JA ниже, но все же в основном

258 значимы при $P < 0,01$ до 1920-х годов. Корреляции быстро уменьшаются в 1930-е годы, но становятся

259 значимых для большинства температурных значений в начале 1950-х годов в течение примерно десятилетия. С 1965 г.

260 (r рассчитано для периода 1950–1980 гг.) корреляции в целом незначимы ($P < 0,01$), за исключением

261 для средних температур июля-августа. За период 1901–1940 гг. корреляции с МЈЈА

262 температура означает $r > 0,4$ ($P < 0,01$) для южнотаежной хронологии MXD, разбросанной между

263 45° и 75° с.ш. с юга на север (рис. 5Б). Область с высокой корреляцией простирается от 65° в.д.

от 264 до 105° в.д. в северных широтах и от 75° до 100° в.д. на юге Сибири. За период

265 с 1970 по 2009 год, для отдаленного региона обнаружены низкие, но все же статистически значимые корреляции.

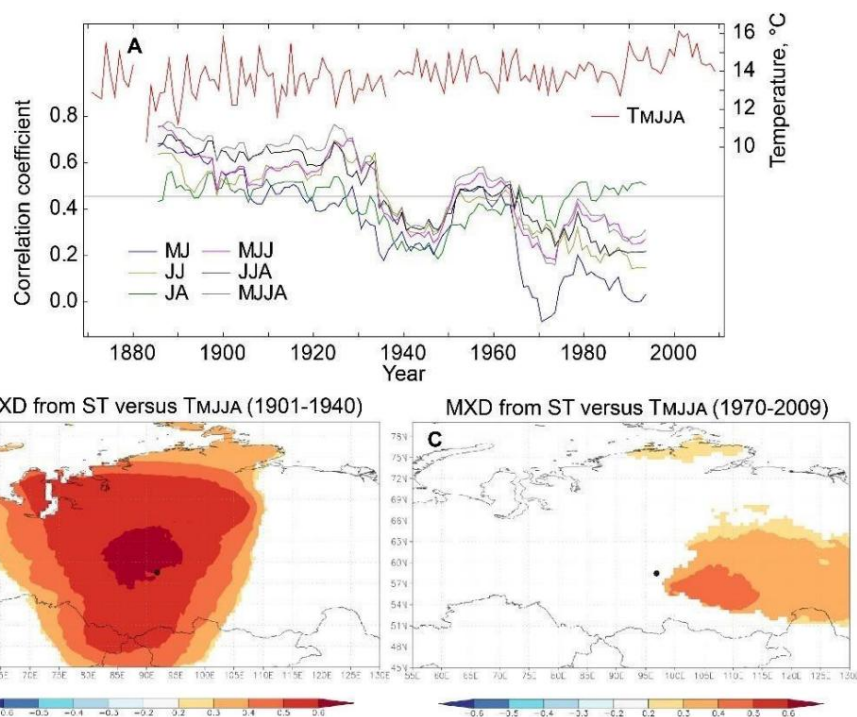
266 к востоку от участка исследований ST (рис. 4В).

267 Удивительно, но корреляции с ежемесячными и сезонными суммами осадков не дали результатов.

268 выявили какое-либо значимое ($P < 0,01$) положительное влияние осадков на MXD во время недавнего

269 десятилетия в лесотундре и южной тайге Центральной Сибири (не показано).

270270



272 Рис. 5. Средние значения температуры МЈЈА в Енисейске (красный цвет) с 31-летним интервалом корреляции 273
274 между стандартной хронологией максимальной плотности поздней древесины (MXD) и средними температурами
275 теплого месяца (с 274 мая по август) на южнотаежном участке ST (A). Соответствующая корреляция 276 полей за 1901–
1940 гг. (Б) и 1970–2009 гг. (В). Горизонтальная линия указывает уровень значимости 276 $P < 0,01$.

277

278

279

280

281 Обсуждение

282 Наши результаты показывают, что лиственницы в лесотундре Центральной Сибири, как правило, старше и образуют

283 годовые кольца более узкие по сравнению с южной тайгой. Эти результаты, а также более высокая чувствительность

284 Хронологии TRW и MXD из сурового климата северной границы леса по сравнению с древесно-

Статистика колец 285 в более мягких условиях не удивительна (Fritts, 1976). Сезонный рост деревьев в

286 Северная Сибирь начинается позже и демонстрирует более сильную зависимость от летней температуры.

287 (Ваганов и др., 1996, 1999; Кнорре и др., 2006; Кирдянов и др., 2007, 2024; Эспер и др., 2010;

288 Брюханова и др., 2013; Ринне и др., 2016; Бюнтген и др., 2021а; Хантемиров и др., 2022;

289 Kharuk et al., 2023в), что подтверждают и наши результаты. Напротив, влияние климата

290 на деревьях, произрастающих в более благоприятном температурном режиме и гидроклимате южной тайги.

291 менее выражен, что объясняет низкую корреляцию TRW по ST с климатическими переменными.

292 Однако MXD из южнотаежного участка ST содержат удивительно сильный температурный сигнал.

293, что подтверждает превосходство этого показателя годовых колец для дендроклиматологии не только на высоких

294 широты и высоты (Briffa et al., 1988, 2004; Büntgen et al., 2024), но и для условий

295 с меньшими климатическими ограничениями для роста деревьев на юге Сибири.

296 TRW в лесотундре в целом соответствует динамике летних температур, включая недавние

297 потепление (см. рис. 1 и 2А). Кроме того, сильная реакция MXD на температуру постоянна.

298 во времени и показывает схожий пространственный охват за два периода продолжительностью около 40 лет. Отсутствие

299 отмечено увеличение MXD в последние десятилетия после регионального летнего потепления после

300 1990-е годы можно считать единственным свидетельством ДП в наших исследовательских центрах FT. Однако у нас есть

301 нет данных MXD за последнее десятилетие и не может судить об изменениях MXD за период

302 наиболее резких повышения температуры. Напротив, рекорд MXD в южной тайге

303 демонстрирует сильное снижение зависимости формирования поздней древесины от поздней весны и лета.

304 температуры, начиная с 1930-х годов, что является типичным проявлением проблемы ДП.

305 (Д'Арриго и др., 2008). Более того, пространственный охват значимых корреляций также имеет решающее значение.

306 уменьшилась в пространстве (см. рис. 5Б и 5В). Эти изменения в реакции роста деревьев на температуру

307 между участками исследования из разных растительных зон бореальных лесов демонстрируют пространственные
308 неоднородность силы и времени ДП в Центральной Сибири. Пространственная неоднородность
309 ДП был ранее описан в литературе (Briffa et al., 1998; D'Arrigo et al., 2008). Однако в
310 В этом исследовании мы приводим доказательства существования ДП в южнотаежном регионе Сибири, который расположен
311 >1600 км южнее лесотундры. Этот вывод частично противоречит более ранним данным, утверждающим, что
312 Явление ДП наиболее выражено в высоких широтах и в меньшей степени в более низких широтах.
313 (Briffa et al. 1998; Cook et al. 2004; Buntgen et al. 2008, 2016, 2024).

314 Возможные причины возникновения ДП ранее уже были указаны и апробированы в
315 литературы (Д'Арриго и др., 2008; Франк и др., 2007; Эспер и Франк, 2009). Эти причины могут
316 значительно различаются между регионами, но неспособность данных годовичных колец следовать за температурой
В качестве одной из наиболее примечательных причин было указано 317 увеличение. В нашем северном регионе исследования
318 Летняя температура обычно все еще ниже 12°C. Вероятно, это ниже порога, выше которого
319 температура перестает непосредственно лимитировать рост деревьев (Ваганов и др., 2006) и не может вызвать ДП.
320 С другой стороны, ранее было показано, что существуют явные доказательства существования ДП на региональном
321 на севере Центральной Сибири (Briffa et al., 1998; Кирдянов и др., 2020), что, вероятно,
322 может быть инициировано диммированием из-за выбросов SO₂ от промышленности Норильска и междугородной связи.
323 атмосферный перенос из нижних широт (Кирдянов и др., 2020; Бунтген и др., 2021б).

324 Прямое и косвенное воздействие загрязнения воздуха на растительность региона было также обнаружено
325 Панюшкина и др. (2016) и Харук и др. (2023а,б). Однако сравнительно небольшой ДП в нашем
326 северных исследовательских площадок не удивительны, поскольку ранее было показано, что ДП может быть площадкой-
327 специфическое явление даже в пределах одного региона (Buntgen et al., 2021а, 2024; Yin et al., 2021).
328 Это позволяет нам рассматривать годовичные кольца как ценный индикатор летних температур при
329 точный выбор мест годовичных колец и параметров.

330 В южной тайге летняя температура повышалась на протяжении всего периода
331 инструментальная запись с 1870-х годов (рис. 1). Учитывая относительно высокую среднюю летнюю
332 температуры до 19,4 °C в 2012 г. и в целом > 15,5 °C в течение 31-летнего периода, мы

333 можно предположить, что даже небольшое потепление может привести к тому, что температура достигнет порога, выше которого

334 он не ограничивает напрямую рост годовых колец в течение большей части вегетационного периода (Ваганов и др., 2006).

335 Чтобы выяснить причину ДП в южном регионе, мы должны также учитывать тот факт, что

Площадка 336 ST была создана в населенной местности. Хотя мы выбрали место, которое

337 удаленных от населенных пунктов и не имеющих следов прямого антропогенного или природного нарушения, мы

338 не можем исключить влияние некоторых из этих факторов на рост деревьев в прошлом. Таким образом, чем шире

339 исследованных территорий были сильно вырублены в XX веке (Миронов, 2009; Данилин, Кроу, 2008), что

340 вызвали изменения регионального гидрологического режима (Онучин и др., 2017; Wei et al., 2022; Jones

341 и др., 2022; Zhao et al., 2021), что еще больше влияет на биогеохимию и динамику лесных экосистем,

342 , а также рост деревьев на огромных территориях (Kreutzweiser et al., 2008; Thaxton et al., 2023).

343 Аналогичным образом, нашествие насекомых и пожары низкой интенсивности также могут влиять на зависимость роста деревьев от

344 о температуре (Gustafson et al., 2010; Itter et al., 2019; Trindade et al., 2011; Wirth et al., 2002;

345 de Andrés et al., 2022, Чебакова и др., 2022). Поэтому больше данных об участке и региональном лесу

346 анамнезов необходимы, чтобы сделать правильный вывод о причинах, вызвавших ДП в нашем исследовательском центре.

347 в первой половине 20 века.

348 Здесь мы проанализировали данные только из двух регионов Центральной Сибири и обнаружили большое

349 неоднородность силы ДП и возможные причины возникновения явления. В то же

В 350 раз недавнее исследование продемонстрировало доказательства существования ДП регионального масштаба в лесах высоких широт.

351 пояс в пределах того же района (Кирдянов и др., 2020). Эти два как-то противоречивых вывода

352 указывают на необходимость лучшего понимания пространственно-временных изменений в росте деревьев.

353 чувствительность к температуре в различных регионах бореальных лесов, и особенно в Сибири (Бюнтген

354 и Rees 2023), который плохо представлен в международных базах данных по годовым кольцам. Это может только

355 может быть достигнуто с помощью точного изучения каждого участка вновь собранных и обновленных данных о годовых кольцах из

356 удаленных мест в бореальных лесах. Эти данные также крайне необходимы для дальнейшего выяснения эффекта

357 изменения климата на лесные экосистемы, связывание ими углерода и окружающую среду (Лопес-

358 Бланко и др., 2024).

359359

360 выводов

361 Наши результаты демонстрируют «проблему дивергенции» в хронологии максимума поздней древесины годовичных колец.

362 из двух отдаленных и экологически разных зон растительности бореальных лесов центральной

363 Сибирь: лесотундра и южная тайга. ДП в этих двух регионах различается по интенсивности и может

364 быть вызваны различными климатическими и экологическими факторами. Тем не менее, мы сообщаем о текущих

365 пригодность тщательно отобранных находок древесных колец с севера Центральной Сибири для

366 температурных реконструкций. Дальнейшее увеличение разницы между ростом деревьев и температурой.

367 может иметь серьезные последствия для динамики углеродного и водного цикла в условиях более теплого климата.

368 , и его необходимо исследовать с использованием более плотной сети обновленных данных годовичных колец.

369369

370 Благодарности: Поддержана Российским научным фондом (проект № 22-14-00048).

371 Проект ФСРЗ-2020-0014 Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

372 Федерация поддержала обновление данных по южной тайге и предоставила ФСРЗ-2023-0007.

373 оборудования. UB и JE получили финансирование в рамках гранта Чешского научного фонда HYDRO8.

374 (23-080495) и грант ERC Advanced MONOSTAR (AdG 882727).

375375

376 Конфликты интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

377377

378 ссылок

379 Абаимов А.П., Бондарев А.И., Зырянова О.А., Шитова С.А., 1997. Полярные леса Красноярск.

380 Область, край. Наука, Новосибирск, 208 с.

381 Анчукайтис, К.Дж., Д'Арриго, Р.Д., Андреу-Хейлс, Л., Франк, Ф., Верстеге, А., Кертис, А., Бакли,

382 Б.М., Джейкоби, Г.К., Кук, Э.Р., 2013. Летние температуры, восстановленные по годовичным кольцам деревьев, по данным

383 Северо-запад Северной Америки в течение последних девяти веков. Дж. Клим. 26, 3001–3012.

384 <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00139.1>.

385 Анчукайтис, К.Дж., Уилсон, Р., Бриффа, К.Р., Бюнтген, У., Кук, Э.Р., Д'Арриго, Р., Дави, Н., Эспер,

386 Дж., Франк Д., Гуннарссон Б.Е., Хегерл Г., Хелама С., Клессе С., Крушич П.Дж., Линдерхольм,

- 387 Х.В., Миглан В., Осборн Т.Дж., Чжан П., Ридвал М., Шнайдер Л., Шурер А., Уайлс Г.,
- 388 Зорита, Э., 2017. Летние температуры в Северном полушарии последнего тысячелетия по годичным кольцам:
- 389 Часть II, пространственно разрешенные реконструкции. Кват. наук. Откр. 163, 1–22.
- 390 <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2017.02.020>.
- 391 Анисимов О.А., 2007. Потенциальная обратная связь таяния вечной мерзлоты с глобальной климатической системой.
- 392 через метан эмиссия. Окружающая среда. Рез. Летт. 2, 045016.
- 393 <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/2/4/045016>
- 394 Анисимов О., Ренева С., 2006. Вечная мерзлота и изменение климата: российский взгляд.
- 395 Амбио 35, 169–175. <https://www.jstor.org/stable/4315715>.
- 396 Бьорклунд Дж., Сефтиген К., Стоффель М., Фонтини М.В., Коттлоу С., Франк Д.К., Эспер Дж., Фонтини П.,
- 397 Гусс Х., Грудд Х., Гуннарссон Б.Е., Нивергельт Д., Пелиццари Э., Каррер М., фон Аркс,
- 398 Г., 2023. Анатомия годичных колец Фенноскандинавии показывает более теплый современный климат, чем средневековый.
- 399 Природа 620, 97–103. <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06176-4>.
- 400 Бокс, Дж.Э., Колган, В.Т., Кристенсен, Т.Р., Шмидт, Н.М., Лунд, М., Парментье, Ф.-Ю.В., Браун,
- 401 Р., Бхатт, США, Ойскирхен, Э.С., Романовский, В.Е., Уолш, Дж.Э., Оверленд, Дж.Э., Ван, М.,
- 402 Корелл, Р.В., Мейер, В.Н., Воутерс, Б., Мернильд, С., Морд, Дж., Павляк, Дж., Олсен, М.С., 2019.
- 403 Ключевые индикаторы изменения климата Арктики: 1971–2017 гг. Окружающая среда. Рез. Летт. 14, 045010.
- 404 <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/aafc1b/meta>.
- 405 Бриффа, К.Р., Джонс, П.Д., Швайнгрубер, Ф.Х., 1988. Летние температурные режимы в Европе:
- 406 Реконструкция 1750 года нашей эры на основе показателей максимальной плотности поздней древесины хвойных пород.
- 407 Кват. Рез. 30, 36–52. [https://doi.org/10.1016/0033-5894\(88\)90086-5](https://doi.org/10.1016/0033-5894(88)90086-5).
- 408 Бриффа К.Р., Осборн Т.Дж., Швайнгрубер Ф., 2004. Крупномасштабные выводы о температуре по дереву.
- 409 кольца: обзор. Глобальная планета. Изменение 40, 11–26. <https://doi.org/10.1016/S0921->
- 410 8181(03)00095-X.
- 411 Брюханова М.В., Кирдянов А.В., Прокушкин А.С., Силкин П.П., 2013. Особенности
- 412 ксеногенеза у лиственницы даурской *Larix gmelinii* (Rupr.) Rupr., произрастающей на вечномерзлых почвах в
- 413 Средней Сибири. Расс. Дж. Эко. 44, 361–366. <https://doi.org/10.1134/S1067413613050044>.
- 414 Бюнтген У., Франк Д.К., Уилсон Р., Каррер М., Урбинати К., Эспер Дж., 2008. Тестирование на дерево-
- 415 кольцевая дивергенция в Европейских Альпах. Глоб. Чанг. Биол. 14, 2443–2453.
- 416 <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01640.x>
- 417 Бюнтген У., Миглан, В.С., Юнгквист, ФК, Маккормик, М., Ди Космо, Н., Зигль, М., Юнгклаус,
- 418 Дж., Вагнер С., Крушич П.Дж., Эспер Дж., Каплан Дж.О., де Ваан, М.А.К., Лютербахер Дж., Вакер,
- 419 Л., Тегель В., Кирдянов А.В., 2016. Похолодание и социальные изменения в эпоху поздней античности.
- 420 Малый ледниковый период с 536 по 660 год нашей эры. Нат. Геосци. 9, 231–236.
- 421 <https://www.nature.com/articles/ngeo2652>.

- 422 Бюнтген У., Аллен К., Анчукайтис К., Арсено Д., Буше Э., Браунинг А., Чаттерджи С.,
 423 Керубини П., Чуракова (Сидорова) О.В., Корона К., Дженнаретти Ф., Гриссингер Ж., Гийе,
 424 С., Гио Дж., Гуннарсон Б., Хелама С., Хохройтер П., Хьюз М.К., Хайберс П.,
 425 Кирдянов А.В., Крушич П.Дж., Людешер Дж., Мейер В.Дж.-Х., Мыглан В.С., Николусси К.,
 426 Оппенгеймер К., Рейниг Ф., Зальцер М.В., Сефтиген К., Стайн А.Р., Стоффель М., Ст.Джордж,
 427 С., Техедор Э., Тревино А., Труэ В., Ван Дж., Уилсон Р., Ян Б., Сюй Г., Эспер Дж., 2021а.
 428 Влияние принятия решений при реконструкции климата на основе годовичных колец. Нат. Коммун.
 429 12, 3411. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-23627-6>.
- 430 Бюнтген У., Кирдянов А.В., Крушич П.Я., Шишов В.В., Эспер Дж., 2021b. Арктические аэрозоли и
 431 «Проблема дивергенции» в дендроклиматологии. Дендрохронология 67, 125837.
 432 <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2021.125837>.
- 433 Бюнтген У., Рис Г., 2023. Исследования глобальных изменений требуют международного сотрудничества. наук. Общий
 434 Окружающая среда. 902, 166054. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166054>.
- 435 Бюнтген У., Рейниг Ф., Верстеге А., Пьерматтей А., Кунц М., Крушич П., Славин П., Штепанек П.,
 436 Торбенсон М., дель Кастильо Э.М., Арозио Т., Кирдянов А., Оппенгеймер К., Трнка М.,
 437 Палоссе А., Бебчук Т., Камареро Дж. Дж., Эспер Дж., 2024. Недавнее летнее потепление над
 438 регион западного Средиземноморья беспрецедентен со времен средневековья. Глобальная планета. Изменять
 439 232, 104336. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2023.104336>.
- 440 Камареро, Дж.Дж., Газоль, А., Санчес-Сальгеро, Р., Фахардо, А., Макинтайр, Э.Дж.Б., Гутьеррес, Э.,
 441 Батллори Э., Будро С., Каррер М., Дьес Ж., Дюфур-Трембле Г., Гейр Н.П., Хофгаард,
 442 А., Джомелли В., Кирдянов А.В., Левеск Э., Лян Э., Линарес Х.К., Матисен И.Е.,
 443 Моисеев П.А., Сангуэса-Барреда Г., Шреста К.Б., Тойвонен Ю.М., Тутубалина О.В.,
 444 Уилмкинг, М., 2021. Глобальное затухание связи роста температуры в альпийских и полярных районах.
 445 линии деревьев. Глоб. Чанг. Биол. 27 (9), 1879–1889. <https://doi.org/10.1111/gcb.15530>.
- 446 Чебакова Н.М., Бажина Е.В., Парфенова Е.И., Сенашова В.А., 2022. В поисках X-фактора:
 447 Обзор публикаций по проблеме исчезновения/отмирания темнохвойных лесов на Севере
 448 Евразия. Расс. Метеорол. Гидрол. 47(5), 405–417.
 449 <https://doi.org/10.3103/S1068373922050090>.
- 450 Кук, Э.Р., Эспер, Дж., Д'Арриго, Р., 2004. Температура суши во внетропических районах Северного полушария.
 451 изменчивость за последние 1000 лет. Кват. наук. Ред. 23, 2063–2074 гг.
 452 <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2004.08.013>.
- 453 Д'Арриго Р., Уилсон Р., Липерт Б., Керубини П., 2008. О «проблеме дивергенции» в
 454 Северные леса: обзор свидетельств годовичных колец и возможных причин. Глобальная планета.
 455 Изменение 60 (3–4), 289–305. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2007.03.004>.

- 456 Данилин И.М., Ворона Т.Р., 2008. Великий сибирский лес: вызовы и возможности
 457 Scale., в: Лафортецца Р., Санези Г., Чен Дж., Кроу Т.Р. (ред.), Закономерности и процессы в
 458 Лесные пейзажи. Спрингер, Дордрехт, стр. 47–66. [https://doi.org/10.1007/978-1-4020-](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8504-8_4)
 459 8504-8_4.
- 460 Дави, Н.К., Джейкоби, Г.К., Уайлс, Г.К., 2003. Изменчивость бореальной температуры выведена из
 461 данные о максимальной плотности поздней древесины и ширине годовых колец, регион гор Врангель, Аляска.
 462 Кват. Рез. 60(3), 252-262. <https://doi.org/10.1016/j.yqres.2003.07.002>.
- 463 де Андрес, Е.Г., Шестакова, Т.А., Шолтен, Р.К., Делькур, С.Ф., Горина, Н.В., Камареро, Дж.,
 464 2022. Изменения в синхронности роста и устойчивости деревьев в лесах *Pinus sylvestris* сибирской.
 465 модулируется динамикой пожаров и экогидрологическими условиями. Агр. Лесной Метеорол. 312,
 466 108712. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2021.108712>.
- 467 Эспер Дж., Франк Д., 2009. Ловушки расхождения в исследованиях годовых колец. Изменение климата 94, 261–266.
 468 <https://doi.org/10.1007/s10584-009-9594-2>.
- 469 Эспер Дж., Франк Д., Бюнтген У., Верстеге А., Хантемиров Р.М., Кирдянов А.В., 2010. Тенденции.
 470 и неопределенности в сибирских индикаторах потепления 20-го века. Глоб. Чанг. Биол. 16, 386–
 471 398. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.01913.x>.
- 472 Франк, Д., Бюнтген, У., Бём, Р., Моугери, М., Эспер, Дж., 2007. Более тёплый ранний инструментал.
 473 измерения в сравнении с более холодными реконструированными температурами: стрельба по движущейся мишени. Кват.
 474 наук. Откр. 26, 3298–3310. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2007.08.002>.
- 475 Фриттс, Х.К., 1976. Годы деревьев и климат. акад. Пресс, Лондон, Нью-Йорк, Сан-Франциско, 576.
 476 стр.
- 477 Готье С., Бернье П., Куулувайнен Т., Швиденко А.З., Щепаченко Д.Г., 2015. Бореальный
 478 лес здоровье и глобальное изменять. Наука 349 (6250), 819–822.
 479 <https://www.science.org/doi/10.1126/science.aaa9092>.
- 480 Густавсон Э.Дж., Швиденко А.З., Стертевант Б.Р., Шеллер Р.М., 2010. Прогнозирование глобальных изменений.
 481 воздействие на биомассу и состав лесов на юге центральной Сибири. Экол. Прил. 20 (3), 700–
 482 715. <https://doi.org/10.1890/08-1693.1>.
- 483 Хантемиров Р.М., Корона К., Гийе С., Шиятов С.Г., Стоффель М., Осборн Т.Дж., Мелвин Т.М.,
 484 Горланова Л.А., Кукарских В.В., Сурков А.Ю., фон Аркс Г., Фонт П., 2022. Текущая информация.
 485 Сибирское отопление является беспрецедентным за последние семь тысячелетий. Нат. Коммун. 13, 4968.
 486 <https://doi.org/10.1038/s41467-022-32629-x>.
- 487 Харрис И., Осборн Т.Дж., Джонс П., Листер Д., 2020. Версия 4 ежемесячного максимума CRU TS.
 488 многомерное с сеткой разрешения климат набор данных. наук. Данные 7, 109.
 489 <https://doi.org/10.1038/s41597-020-0453-3>.

- 490 Холлоуэй Дж. Э., Левкович А. Г., 2020. Полвека прерывистого существования вечной мерзлоты.
и деградация в западной Канаде. Пермафр. Периглак. Процесс. 31 (1), 85–96.
<https://doi.org/10.1002/ppp.2017>.
- 493 Иттер, М.С., Д'Оранжвилль, Л., Доусон, А., Нишоу, Д., Дашен, Л., Финли, АО, 2019.
Бореальный рост деревьев демонстрирует экологическую память десятилетнего масштаба к засухе и насекомым.
дефолиации, но никакой негативной реакции на их взаимодействие. Дж. Экол. 107(3), 1288-1301.
<https://doi.org/10.1111/1365-2745.13087>
- 497 Джейкоби, Г.К., Д'Арриго, Р., 1989. Реконструированная годовая температура в Северном полушарии с тех пор.
1671 г. на основе данных о годовых кольцах в высоких широтах Северной Америки. Изменение климата 14, 39–59.
<https://doi.org/10.1007/BF00140174>
- 500 Джейкоби, Г.К., Д'Арриго, Р., 1995. Ширина и плотность годовых колец свидетельствуют о климатических и потенциальных
Изменение лесов на Аляске. Глоб. Биогеохим. Циклы. 9, 227–234.
<https://doi.org/10.1029/95GB00321>.
- 503 Цзяо Л., Цзян Ю., Чжан В.Т., Ван М.-К., Чжан Л.-Н., Чжао С.-Д., 2015. Дивергент
реакция на климатические факторы в радиальном росте *Larix sibirica* в восточном Тянь-Шане
Горы, северо-запад Китая. Деревья 29, 1673–1686. <https://doi.org/10.1007/s00468-015-1248-6>.
- 507 Джонс Дж., Эллисон Д., Ферраз С., Лара А., Вэй Х., Чжан Э., 2022. Восстановление лесов и
гидрология. Для. Экол. Менеджер. 520, 120342. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120342>.
- 509 Харук В.И., Пономарев Е.И., Иванова Г.А., Двинская М.Л., Куган С.С.П., Фланниган М.Д.,
2021. Лесные пожары в сибирской тайге. Амбио 50 (11), 1953–1974 гг.
<https://doi.org/10.1007/s13280-020-01490-x>.
- 512 Харук В.И., Петров И.А., Им, С.Т., Голуков А.С., Двинская М.Л., Шушпанов А.С., 2023а.
Загрязнение и влияние климата на деревья на водно-болотных угодьях Сибирской Арктики. Вода 15, 215.
<https://doi.org/10.3390/w15020215>
- 515 Харук В.И., Петров И.А., Им, С.Т., Голуков А.С., Двинская М.Л., Шушпанов А.С.,
Савченко А.П., Темерова В.Л., 2023б. Субарктическая растительность в условиях смешанного потепления и
Влияние загрязнения воздуха. Леса 14, 615. <https://doi.org/10.3390/f14030615>.
- 518 Харук В.И., Петров И.А., Кривобоков Л.В., Голуков А.С., Двинская М.Л., Им, С.Т.,
Шушпанов А.С., Смит К.Т., 2023в. Реакция лиственницы на потепление в северной Сибири. Рег.
Окружающая среда. Изменять. 23, 17. <https://doi.org/10.1007/s10113-022-02016-9>.
- 521 Кирдянов А.В., Крушич П.Я., Шишов В.В., Ваганов Е.А., Фертиков А.И., Мыглан В.С.,
Баринов В.В., Брауз Ж., Эспер Ю., Ильин В.А., Кнорре А.А., Корец М.А., Кукарских,
В.В., Машуков Д.А., Онучин А.А., Пьерматтей А., Пименов А.В., Прокушкин А.С.,
Рыжкова В.А., Шишкин А.С., Смит К.Т., Тайник А.В., Вильд М., Зорита Э., Бюнтген,

- 525 У., 2020. Экологические и концептуальные последствия загрязнения Арктики. Экологические письма 23
526 (12), 1827–1837. <https://doi.org/10.1111/ele.13611>.
- 527 Кирдянов А.В., Ваганов Е.А., Хьюз М.К., 2007. Отделение климатического сигнала от древесно-
528 ширина кольца и максимальная плотность поздней древесины. Деревья 21 (1), 37–44.
529 <https://doi.org/10.1007/s00468-006-0094-y>.
- 530 Кирдянов А.В., Заурер М., Арзак А., Кнорре А.А., Прокушкин А.С., Чуракова (Сидорова),
531 О.В., Арозио Т., Бебчук Т., Зигвольф Р., Бюнтген У. 2024., Таяние вечной мерзлоты может
532 смягчить стресс, вызванный засухой, вызванный потеплением, для деревьев бореальных лесов. наук. Тотальная среда. 912,
533 168858. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168858>.
- 534 Кирпотин С.Н., Каллаган Т.В., Перегон А.М., Бабенко А.С., Берман Д.И., Булахова Н.А., Бизаакай
535 А.А., Черных Т.М., Чурсин В., Интересова Е.А., Гуреев С.П., Керчев И.А., Харук В.И., Ховалыг
536 А.О., Колпащиков Л.А., Кривец С.А., Квасникова З.Н., Кужевская И.В., Мерзляков О.Е.,
537 Нехорошев О.Г., Попков В.К., Пяк А.И., Валевиц Т.О., Волков ИВ, Волкова ИИ. Воздействие
538 изменение окружающей среды на биоразнообразие и динамику растительности в Сибири. 2021. Амбио
539 50 (11), 1926–1952. дои: 10.1007/s13280-021-01570-6.
- 540 Кнорре А.А., Кирдянов А.В., Ваганов Е.А., 2006. Климатически обусловленная межгодовая изменчивость.
541 в надземном производстве в лесотундре и северной тайге Средней Сибири. Экология
542 147, 86-95. <https://doi.org/10.1007/s00442-005-0248-4>.
- 543 Крейцвайзер, Д.П., Хэзлетт, П.В., Ганн, Дж.М., 2008. Воздействие лесозаготовок на биогеохимию
544 Почвы бореальных лесов и экспорт питательных веществ в водные системы: обзор. Окружающая среда. Откр. 16, 157–
545 179. <https://doi.org/10.1139/A08-006>.
- 546 Li, JX, Li, JB, Li, T., Au, TF, 2020. Отклонение роста деревьев от зимней температуры в
547 Горы Гонга, юго-восточное Тибетское нагорье. Азиатская геогр. 37 (1), 1–15.
548 <https://doi.org/10.1080/10225706.2019.1666015>.
- 549 Лопес-Бланко, Э., Топп-Йоргенсен, Э., Кристенсе, Т.Р., Раш, М., Сков, Х., Арндал, М.Ф., Брет-
550 Харт, М.С., Каллаган, ТВ, Шмидт, Нью-Мексико, 2024 г. На пути к все более предвзятому взгляду на
551 Арктические перемены. Нат. Клим. Чанг. 14, 152–155. <https://doi.org/10.1038/s41558-023-01903-1>.
- 552 Миронов Г.С., 2009. Лесная нива Красноярья. Литера-Принт, Красноярск, 191 стр. (на русском языке).
- 553 Ньюболд Т., Хадсон Л.Н., Хилл СЛЛ, Конту С., Лысенко И., Старший Р.А., Бёргер Л., Беннетт,
554 Диджей, Чоймес, А., Коллен, Б., Дэй, Дж., Де Пальма, А., Диас, С., Эчеверриа-Лондоньо, С., Эдгар,
555 М.Дж., Фельдман, А., Гарон, М., Харрисон, МЛК, Альхуссейни, Т., Ингрэм, DJ, Итеску, Ю.,
556 Каттге Дж., Кемп В., Киркпатрик Л., Клейер М., Коррейя ДЛП, Мартин С.Д., Мейри С.,
557 Новосолов М., Пан Ю., Филлипс ХРП, Первс Д.В., Робинсон А., Симпсон Дж., Так С.Л.,
558 Вейхер Э., Уайт Х.Дж., Эверс Р.М., Мейс Г.М., Шарлеманн Дж.П.В., Первис А., 2015.

- 559 Глобальное воздействие землепользования на местное наземное биоразнообразие. Природа 520, 45–50.
- 560 <https://doi.org/10.1038/nature14324>.
- 561 Онучин А., Буренина Т., Павлов И., 2017. Гидрологические последствия лесозаготовок в
- 562 Пейзаж Зоны из Сибирь. Окружающая среда 4, 51.
- 563 <https://doi.org/10.3390/environments4030051>
- 564 Панюшкина ИП, Шишов В.В., Грачев А.М., Кнорре А.А., Кирдянов А.В., Ливитт С.В.,
- 565 Ваганов Е.А., Чебыкин Е.П., Жученко Н.А., Хьюз М.К., 2016. Тенденции элементной
- 566 скопления годичных колец Сибирской Арктики. Дерево-Кольцо Рез. 72 (2), 67–77.
- 567 <http://dx.doi.org/10.3959/1536-1098-72.02.67>.
- 568 Пяо, С., Ван, Х., Парк, Т., Чен, К., Лиан, Х., Хе, Ю., Бьерке, Дж.В., Чен, А., Сяйис, П.,
- 569 Тёммервик, Х., Немани, Р.Р., Минени, РБ, 2020. Характеристики, движущие силы и отзывы.
- 570 глобального озеленения. Нат. Преподобный Earth Environ. 1, 14–27. [https://doi.org/10.1038/s43017-019-](https://doi.org/10.1038/s43017-019-0001-x)
- 571 0001-х.
- 572 Пономарев Е.И., Харук В.И., Рэнсон К.Дж., 2016. Динамика лесных пожаров в сибирских лиственных лесах.
- 573 Леса 7, 125. <https://doi.org/10.3390/f7060125>.
- 574 Пономарев Е.И., Забродин А.Н., Швецов Е.Г., Пономарева Т.В., 2023. Интенсивность лесных пожаров и
- 575 Пожарные выбросы в Сибири. Пожар 6, 246. <https://doi.org/10.3390/fire6070246>.
- 576 Ринн, Ф., 2003. TSAP-Win – Анализ и представление временных рядов. Дендрохронология и
- 577 Связанные приложения. Фрэнк Ринн, Гейдельберг.
- 578 Ринне К.Т., Заурер М., Кирдянов А.В., Брюханова М.В., Прокушкин А.С., Чуракова
- 579 (Сидорова), О.В., Зигвольф, RTW, 2015. Исследование реакции игольчатых углеводов
- 580 от сибирской лиственницы до климата с использованием анализа $\delta^{13}\text{C}$ для конкретных соединений и анализа концентрации.
- 581 Окружающая среда растительных клеток, 38 (11), 2340-2352. <https://doi.org/10.1111/pce.12554>.
- 582 Швайнгрубер, Ф.Х., 1988. Древесные кольца: основы и приложения дендрохронологии. Ключер
- 583 Academic Publishers, Дордрехт, Нидерланды, Бостон, Массачусетс, США, 276 стр.
- 584 Тей, С., Сугимото, А., Ёненобу, Х., Мацуура, Ю., Осава, А., Сато, Х., Фуджинума, Дж., Максимов,
- 585 Т., 2017. Подходы к анализу годичных колец и моделированию дают противоположный ответ циркумбореальным
- 586 продуктивность лесов и изменение климата. Глоб. Чанг. Биол. 23 (12), 5179–5188.
- 587 <https://doi.org/10.1111/gcb.13780>.
- 588 Такстон Р.Д., Панюшкина И.П., Меко Д.М., фон Аркс Г., Агафонов Л.И., 2023. Количественная оценка.
- 589 конечные белые полосы у *Salix* из р. Енисей, Сибирь и их связь с поздними
- 590 сезонное наводнение. Деревья 37, 821–836. <https://doi.org/10.1007/s00468-023-02386-5>.
- 591 Толмачев А.И., 1931. О распространении древесных пород и северной границе лесов в
- 592 территория между Енисеем и Хатангой. Труды Полярной комиссии СССР.
- 593 Академия наук 5, 1-29 (на русском языке).

- 594 Триндаде М., Белл Т., Ларок К., 2011. Изменение климатической чувствительности двух видов елей.
595 через градиент влажности на северо-востоке Канады. Дендрохронология 29 (1), 25–30.
596 <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2010.10.002>.
- 597 Ваганов Е.А., Шиатов С.Г., Мазепа В.С., 1996. Дендроклиматические исследования в Урало-Сибирском регионе.
598 Субарктическая зона. Наука, Новосибирск, с. 246 (на русском языке)
- 599 Ваганов Е.А., Хьюз М.К., Кирдянов А.В., Швайнгрубер Ф.Х., Силкин П.П., 1999. Влияние
600 влияния снегопадов и сроков таяния на рост деревьев в субарктической Евразии. Природа 400 (6740), 149–151.
601 <https://doi.org/10.1038/22087>.
- 602 Ваганов Е.А., Хьюз М.К., Шашкин А.В., 2006. Динамика роста колец хвойных деревьев:
603 Изображения прошлого и будущего. Экологические исследования, том. 183. Спрингер Наука и
604 Деловые СМИ, Берлин.
- 605 Вей, Х., Джайлс-Хансен, К., Спенсер, С.А., Ге, Х., Онучин, А., Ли, К., Буренина, Т., Ильинцев, А.,
606 Хоу, Ю., 2022. Лесозаготовка и гидрология бореальных лесов: в условиях повышенного и
607 совокупный контекст возмущений. Для. Экол. Менеджер. 522, 120468.
608 <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120468>.
- 609 Вайскопф, С.Р., Рубинштейн, М.А., Крозье, Л.Г., Гайчас, С., Гриффис, Р., Галофски, Дж.Э., Хайд,
610 КЖВ, Тони Лин Морелли, Моризетт, Джей Ти, Муньос, Р. К., Першинг, Эй Джей, Петерсон, Д. Л., Пудель,
611 Р., Штаудингер, МД, Саттон-Гриер, А.Е., Томпсон, Л., Восе, Дж., Вельцин, Дж.Ф., Уайт, К.П.,
612 2020. Влияние изменения климата на биоразнообразие, экосистемы, экосистемные услуги и природные ресурсы.
613 управление ресурсами в США. наук. Тотальная среда. 733, 137782.
614 <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137782>.
- 615 Вигли, ТМЛ, Бриффа, К.Р., Джонс, П.Д., 1984. О среднем значении коррелированных временных рядов
616 с приложениями в дендроклиматологии и гидрометеорологии. Журнал климата и
617 Прикладная метеорология 23 (2), 201–213. <https://www.jstor.org/stable/26181323>.
- 618 Уилсон Р., Д'Арриго Р.Д., Бакли Б.М., Бюнтген У., Эспер Дж., Франк Д., Лакман Б.,
619 Пайетт С., Восе Р., Янгблут Д., 2007. Вопрос расхождений: отслеживание недавнего потепления
620 в масштабах полушария с использованием данных годовичных колец. Дж. Геофиз. Рез. 112, Д17103.
621 <https://doi.org/10.1029/2006JD008318>.
- 622 Вирт К., Шульце Э.-Д., Кушнетова В., Милюкова И., Хардес Г., Сири М., Шульце Б.,
623 Выгодская Н.Н., 2002. Сравнение влияния качества участка, возраста насаждений, пожаров и климата.
624 по надземному производству деревьев в сосновых лесах сибирских. Физиол дерева. 22 (8), 537–552.
625 DOI: <https://doi.org/10.1093/treephys/22.8.537>.
- 626 Инь, Х., Ли, М.-Ю., Хуанг, Л., 2021. Реконструкция средней летней температуры на основе годовичных колец.
627 плотность за последние 440 лет на восточном Тибетском нагорье. Кват. Межд. 571, 81–88.
628 <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2020.09.018>.

629 Чжан Ю., Уилмкинг М., Гоу К., 2009. Изменение взаимосвязи между ростом деревьев и климатом.

630 на Северо-Западе Китая. Растение. Экол. 201, 39–50. <https://doi.org/10.1007/s11258-008-9478-y>.

631 Чжао М., Болл Дж., Брукс Э.С., 2021. Оценка воздействия заготовок древесины на гидрологические

632 чувствительный территории и гидрологическая реакция. Дж. Гидрол. 593, 125805.

633 <https://doi.org/10.1016/j.jhidrol.2020.125805>.