

1. Пространственно-временные изменения температурной чувствительности сибирских деревьев

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 ¹Географический факультет Кембриджского университета, CB2 3EN, Великобритания

8 ²Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр СО РАН»

9 РАН, Академгородок, Красноярск, 660036, Российская Федерация

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

11 ⁴Институт географии РАН, Старомонетный пер., д. 29, г. Москва, 119017, Российская Федерация

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

13 ⁶Центр исследований глобальных изменений, 61300 Брно, Чешская Республика

14 ⁷Географический факультет, Университет Масарика, 61137 Брно, Чешская Республика

15

16 * Автор-корреспондент: ak2118@cam.ac.uk (Александр В. Кирдянов)

17

18

19

20

21

22

23

24

25

26

27

28 Аннотация

29 Антропогенно-индуцированное изменение климата в значительной степени влияет на функционирование растительности

30 сообществ по всему миру. В крупнейшем в мире биоме суши, бореальном лесу, устойчивый

31 За последние десятилетия было зафиксировано ослабление связи между ростом деревьев и повышением летних температур.

32 Эта так называемая «проблема расхождения» (DP) изучалась в течение последних 30 лет, однако причины ее

33 и пространственные закономерности в пределах бореальной лесной зоны не очень хорошо изучены. Здесь мы представляем дерево-

34 кольцевых доказательства изменения DP у *Larix gmelinii* с самого северного в мире лесного острова на

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

36 и максимальная плотность поздней древесины показывают, что DP значительно сильнее на юге, что указывает на

37 , что связь роста и климата у сибирской лиственницы прошла через точку невозврата при более теплом климате

38 климат и возросшее антропогенное давление. На севере температура оставалась сильной и

39 стабильных во времени, что подчеркивает важность хронологий годичных колец для долгосрочного климата

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

41 глобальное потепление в зоне бореальных лесов, из которого пространственно различаются последствия для

42 динамика цикла углерода и воды должна быть ожидаема. Наше исследование подчеркивает важность

43 обновления хронологии годичных колец деревьев в отдаленных регионах в пределах зоны бореальных лесов для содействия пониманию

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

45 биом.

47

48

49

50

51

52

53 Ключевые слова: арктическое затемнение; бореальные леса; дендроклиматология; проблема дивергенции (DP);

54 Глобальное потепление; Пространственно-временная неоднородность

55 Введение

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

57 изменений, которые в значительной степени влияют на функционирование экосистем во всем мире и имеют многочисленные последствия

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

59 Исключительно уязвимые бореальные леса в настоящее время переживают беспрецедентные темпы недавнего вымирания.

60 потепление и увеличение частоты экстремальных погодных явлений, интенсивности лесных пожаров, темпов 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 текущем состоянии различных компонентов бореальных

65 лесных экосистем, включая деревья (Tei et al., 2017).

66 Радиальный рост деревьев в лесном поясе высоких широт циркумполярного региона в северном полушарии был

67 показано, что, по-видимому, они ограничены изменчивостью температуры (Jacoby и D'Arrigo, 1989; Vaganov

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

69 2023). Однако в последние десятилетия наблюдается разрыв связи между ростом деревьев в этих экосистемах и повышением

70 инструментальных летних температур, так называемая «проблема расхождения» (DP) (D'Arrigo et al.,

71 2008), наблюдалось в высокочастотных или низкочастотных доменах или в обоих. DP ставит под сомнение способность

72 северных лесов для увеличения производительности биомассы после текущего потепления. Если DP

73 станет широко распространенным явлением, это также будет иметь большое значение для способности годовичных колец деревьев

74 данных, которые можно использовать в качестве косвенного показателя температуры в прошлые теплые периоды (Бюнтген и др., 2021а) и

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

76 Впервые DP был описан Якоби и Д'Арриго (1995) для белой ели на Аляске, а позднее

77 описаны для различных мест и видов деревьев, в основном в высоких широтах и на большой высоте

78 экосистем (см. обзор D'Arrigo et al. 2008). Доказательства того, что DP является широко распространенным

79 феноменом в лесах высоких широт циркумполярного региона были получены в результате анализа роста деревьев

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

81 также обнаружен в нескольких высокогорных лесах в более низких широтах (Чжан и др., 2009; Цзяо и др., 2015;

82 Ли и др., 2020). Однако некоторые исследования с тех пор показывают, что ДП наблюдается не у всех

83 участка с ограниченной температурой, что означает, что ДР представляет собой пространственно неоднородное явление

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

85 Потенциальные причины ДП были подробно описаны в работе Д'Арриго и др. (2008), и они включают в себя

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

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

88 температура в условиях изменения окружающей среды, изменения концентрации стратосферного озона.

89 выбор правильной целевой переменной температуры также был связан с появлением ДР.

90 зависимость появления ДП от методологических ошибок, связанных с хронологией колец деревьев

91 разработка и качество и применимость инструментальных измерений температуры были

92 рассмотрено Эспером и Фрэнком (2009) и Фрэнком и др. (2007). Недавно роль промышленного

93 Загрязнение и арктическое затемнение как основной фактор ДР в некоторых регионах были изучены в

94 расширенная часть пояса высокоширотных бореальных лесов в Сибири (Кирдянов и др., 2020; Бюнтген

95 и др., 2021b). Однако современное понимание масштаба и причин ДП, а также

96 последствий этого явления далеки от завершения.

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

98 двух широко удаленных лесных регионов в центральной Сибири для проверки роста деревьев на предмет потери чувствительности

99 к температуре в условиях постепенного потепления климата и увеличения антропогенного давления. Мы

100 определить сроки и масштабы ДР в этих экологически различных средах и обсудить

101 полученные результаты относительно возможных причин и последствий ДП.

102102

103 Материалы и методы

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

105 существенно различающихся климатических условий: экотон лесотундры и южная тайга (рис. 1).

106 Климат в районе исследования характеризуется как резко континентальный, с низкой среднегодовой температурой.

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

108 намного теплее, но все еще отрицательные среднегодовые температуры $-1,7^{\circ}\text{C}$ в южном регионе

109 (WMO 29263 «Енисейск»; 1871–2022 и $-1,3^{\circ}\text{C}$ в период 1929–2022). Самое теплое и самое холодное

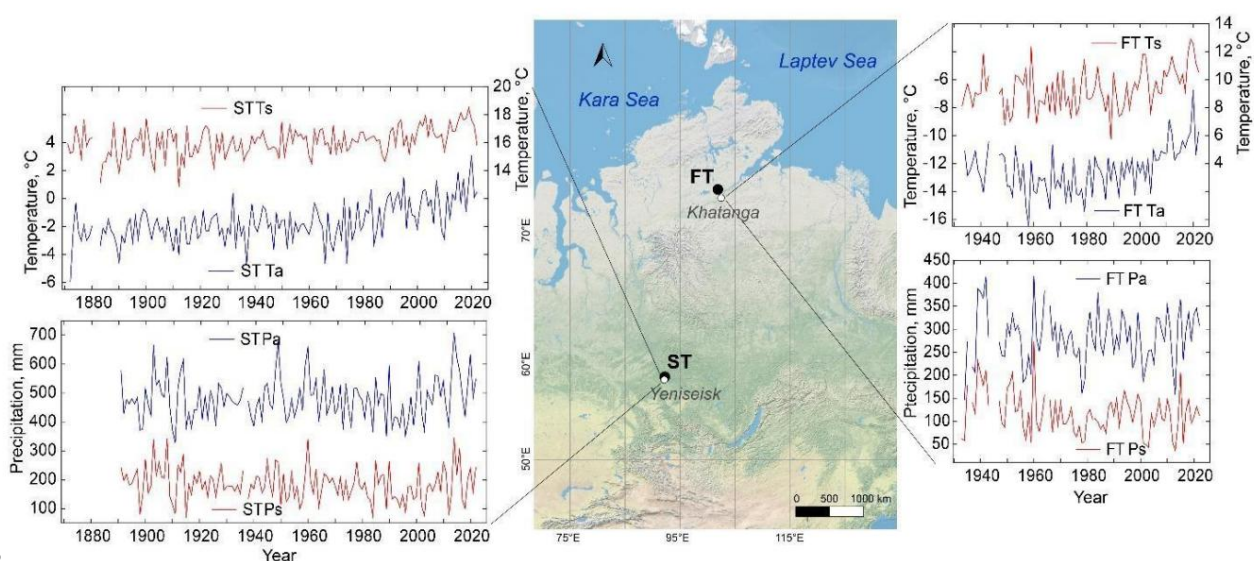
110 месяцев в обоих регионах — июль и январь с месячной температурой $12,6^{\circ}\text{C}$ и $-32,1^{\circ}\text{C}$ в

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

112 соответственно. Годовое количество осадков составляет около 280 мм в лесотундре и около 480 мм,

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

114114



115

116 Рис. 1. Места исследований и климатические данные. На карте показано расположение мест проведения исследований годичных колец (черные круги)

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

118 (синий) температур и осадков зафиксировано на Хатангском и Енисейском метеорологических

119 станций рядом с FT для размещения деревьев ST.

120120

121 Впервые были получены средние значения летних (июнь–август) и годовых температур в лесотундровом регионе.

122 относительно стабильны или немного 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 увеличивается на $0,86$,

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

125 средних температур показали рост с 1871 по 1969 год на $0,05^{\circ}\text{C}/\text{десятилетие}$ ($P > 0,05$) в

126 летом и ежегодно, и рост ускорился с 1970 года 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 коэффициенты летней температуры составляют 0,26 и 0,23 для лесотундры и южной тайги,
- 129 соответственно, но он увеличивается до 0,31 для температуры мая-августа в южной тайге. Годовой и
- 130 сезонных сумм осадков как в лесотундре, так и в южной тайге статистически не отражаются
- 131 значимое изменение ($P > 0,01$).
- 132 Доминирующим видом 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 представления различных деревьев
- 136 условий произрастания *Larix* spp. в центральной Сибири. Расстояние между регионами > 1600
- 137 км, а пункты FT были созданы на самом северном в мире лесном острове Ары-Мас
- 138 характеризуется суровым климатом, условия в ST более мягкие (рис. 1). Деревянные сердечники из этих
- Для измерения профилей плотности годовых колец деревьев и получения данных MXD в соответствии с
- 140 стандартная процедура (Швайнгрубер, 1988). Для обновления хронологии колец деревьев, дополнительный
- В 2019 году в лесотаяжной зоне в непосредственной близости от существующего участка заложен 141 дендрохронологический участок.
- 142 пробных площади, а также участок южной тайги были повторно посещены в 2022 году. Древесный материал 2019 года
- 143 и 2022 использовались для измерения ширины годовых колец деревьев (TRW) на измерительной системе LINTAB
- 144 (RINNTECH eK, Гейдельберг, Германия). Полученные индивидуальные серии были перекрестно датированы с использованием
- 145 TSAP-win (Rinn, 2003). Перекрестное датирование было статистически проверено с помощью COFECHA (Версия
- 146 6.02P; <http://www.ldeo.columbia.edu/tree-ring-laboratory/resources/software>).
- 147 Отдельные серии TRW были стандартизированы с отрицательной экспоненциальной линией с использованием
- 148 Программное обеспечение ARSTAN (<https://www.geog.cam.ac.uk/research/projects/dendrosoftware/>, последний доступ
- 149 от 14.02.2024). Для серии MXD кубические сглаживающие сплайны с 50%-ным срезом частотной характеристики на
- 150 2/3 длины индивидуального ряда были использованы. Двувесовые надежные средние значения индивидуального
- Для создания безразмерных индексных хронологий использовалась 151 серия измерений. Стандартная версия
- 152 из хронологий были выбраны для большинства дальнейших анализов. Остаточная версия была только

153 используется для корреляции с ежемесячными суммами и суммами осадков, которые не отображаются статистически

154 значимых тренда. Для лесотундрового региона мы разработали три локальных TRW и два MXD

155 хронологий, которые имеют различную глубину выборки (таблица) и были высоко значимо коррелированы

156 (по крайней мере $P < 0,001$). Чтобы избежать переоценки влияния участка с более высокой выборкой

157 репликаций, мы сначала разработали локальные хронологии индивидуально, а затем усреднили локальный индекс

158 хронологий в региональные хронологии для FT. В южной тайге параметр годовых колец

159 хронологий были получены для объединенного материала из двух полевых кампаний. Для оценки

160 качество хронологий, их стандартная дендрохронологическая статистика была рассчитана:

161 коэффициент чувствительности, 1 ^{ул} коэффициент корреляции порядка и выраженный популяционный сигнал (EPS).

162 Для оценки климатической чувствительности хронологий TRW и MXD использовалась корреляция Пирсона.

163 коэффициента были рассчитаны на основе среднемесячных значений температуры и сумм осадков

164 ближайшие метеорологические станции (рис. 1) с сентября предыдущего года по сентябрь текущего года

165 год. Температура в июне-июле (JJ) и летом (JJA), а также общее количество осадков летом

166 и сезон со средней месячной температурой ниже $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ (w) были использованы для оценки сезонных

167 климатических влияний. Для холодного сезона общее количество осадков рассчитывалось на основе предыдущих

168 Сентябрь по май текущего года в лесотундре и с октября предыдущего года по апрель текущего года

169 в южной тайге. Оценить временную устойчивость связей между древесно-кольцевыми хронологиями

170 и климатических записей, мы использовали текущие корреляции, рассчитанные для 31-летнего окна с однолетним

Шаг 171 год. Для этого мы использовали средние значения температуры как минимум за два теплых месяца (включая май в

172 южная тайга) как переменные, наиболее коррелирующие с данными годовых колец. Наконец, пространственная корреляция

173 между хронологиями MXD и средними сезонными температурами в сетке (CRU TS4.07, Harris et

174 др., 2020) были рассчитаны для первого и последнего ~ 40-летних периодов доступных инструментальных данных

175 измерений температуры с ближайших метеорологических станций, покрытых данными MXD.

176 лесотундровом регионе мы немного увеличили окно для пространственных корреляций до 41 и 42

177 лет, чтобы охватить весь период метеорологических наблюдений в Хатанге. Представление пространственной

178 корреляций за тот же период, начиная с 1901 года, для двух изученных участков не является надежным из-за

179 отсутствие достоверных данных о температуре в лесотундровом регионе, которые правильно отражают условия

180 до установки метеорологической станции в Хатанге.

181181

182 Результаты

183 Региональные хронологии TRW и MXD из лесотундры (FT) непрерывно охватывают прошлое

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

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

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

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

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

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

191 тайга (0,218). MXD хронологии характеризуются еще более низкой средней чувствительностью. Выраженная

192 сигнал населения (рассчитанный для 50-летних периодов) выше общепринятого

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

194 статистических данных и высокие коэффициенты корреляции между локальными хронологиями колец деревьев ($P < 0,005$) показывают

195 , что объединенные региональные хронологии FT в лесотундре и локальная хронология ST в южной

196 тайги пригодны для дендроклиматического анализа.

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 в следующем

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

201 лесотундра с 1930-х годов, но с небольшим сокращением в 1990-х годах и последующим восстановлением (рис.

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

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

204204

205 Таблица. Характеристики хронологии (TRW = ширина годичного кольца, MXD = максимальная плотность поздней древесины,

206 MSL = средняя длина сегмента, Rbar = межсерийная корреляция, 1 ^{ул} порядок автокорреляции был

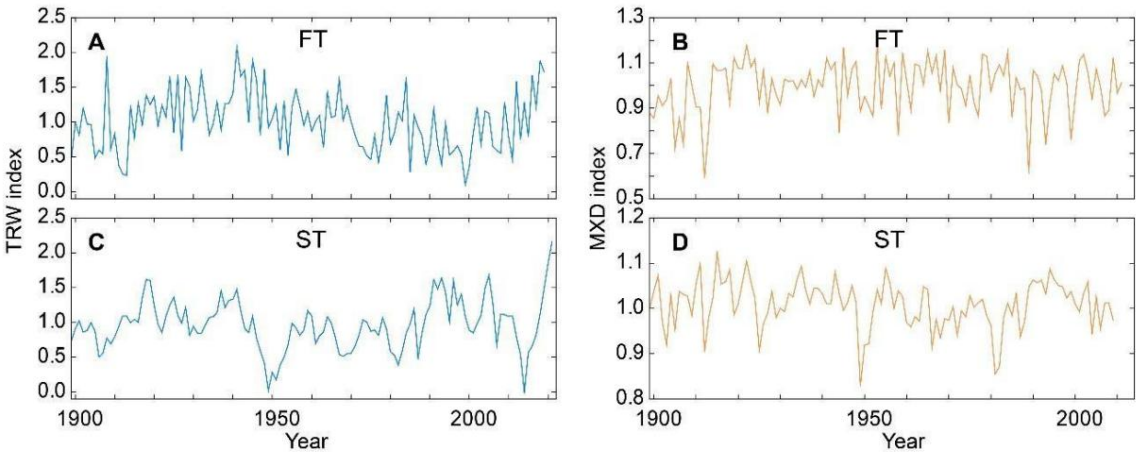
207 рассчитано за период доступных данных о температуре с ближайших метеорологических станций

208 Хатанга и Енисейск)

Область	Сайт	Кольцо дерева	N из	Период, годы	MSL	Среднее значение ± СД	Иметь в виду	1 ^{ул} заказ
		параметр	ряд				чувствительность	автокорреляция
Фторесценция	ФТ1	ТРВ	14	1708 – 2010	125	0,42 ± 0,28 мм	0,48	0,46
	ФТ2	ТРВ	14	1924 – 2011	74	0,44 ± 0,25 мм	0,32	
	ФТ3	ТРВ	41	1582 – 2019	217	0,26 ± 0,19 мм	0,58	
	ФТ1	МХД	14	1708 – 2010	125	0,85 ± 0,13 г/см3	0,16	0,36
	ФТ2	МХД	14	1924 – 2011	74	0,79 ± 0,11 г/см3	0,12	
Южный СТ		ТРВ	24	1711 – 2021	131	1,05 ± 0,54 мм	0,22	0,64
тайга	СТ	МХД	15	1770 – 2009	126	1,01 ± 0,10 г/см3	0,05	0,37

209

210



211

212 Рис. 2. Ширина годичных колец (A, C) и максимальная плотность (B, D) стандартных хронологий для лесов

213 участков тундры (FT) и южной тайги (ST)

214

215 Анализ реакции роста на климат в региональных хронологиях от лесотундры с

216 1929 показывает, что индексы TRW значительно положительно коррелируют со средними температурами июля (P <

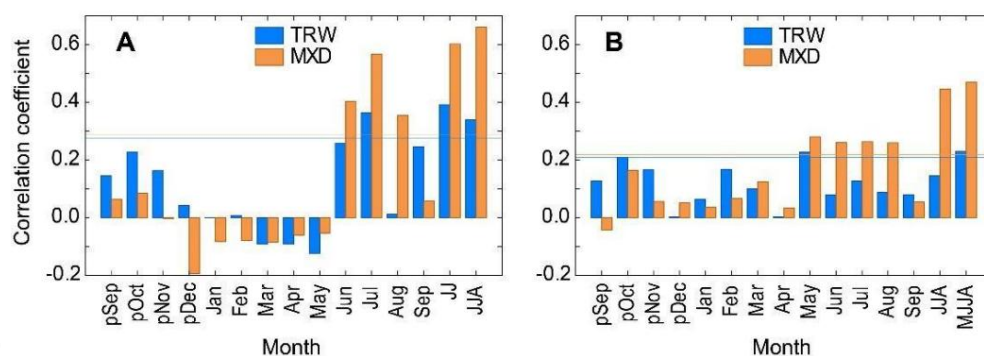
217 0,01) (рис. 3A). Однако MXD демонстрирует более высокие корреляции и для более длительного летнего периода

218 с июня по август. Обе хронологии FT положительно коррелируют с летним сезоном (июнь–

219 Июль и июнь–август) средние температуры (до r = 0,66, P < 0,01 для MXD и лета

220 температура). 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 ежемесячных и
 222 средних сезонных температур с самой высокой корреляцией со средними температурами JJA и MJJA
 223 (до $r = 0,47$, $P < 0,01$). Зависимость параметров годовых колец от осадков в целом
 224 слабее (не показано). Корреляции остаточных хронологий FT ни с ежемесячными, ни
 225 сезонных сумм 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 суммами осадков в июле и летом ($r = -0,32$ и $-0,36$, $P < 0,01$ соответственно).

228228



229229

230 Рис. 3. Климатические сигналы. Коэффициенты корреляции стандартных хронологий TRW и MXD
 231 с ежемесячными и сезонными средними температурами с прошлого года по текущий год в сентябре
 232 кольцевое образование в лесотундре (A) и южной тайге (B) участках. Сезонные средние были
 233 рассчитано для июня – июля (JJ), лета (JJA) и мая – августа (MJJA). Две горизонтальные линии
 234 указывают на уровень значимости $P < 0,01$ для TRW и MXD.

235235

236 Проведение корреляций хронологии индекса MXD из FT со средними летними температурами
 237 являются высокими и достигают $r = 0,71$ и $0,72$ ($P < 0,001$) для летних и июльско-августовских температур,
 238 соответственно (рис. 4A). Корреляции со средней температурой первых двух летних месяцев
 239 (JJ) немного ниже (среднее $r = 0,63$, $P < 0,001$). Временная стабильность температурного сигнала в
 240 MXD подтверждается обширным пространственным покрытием сильных корреляций поля с летним сетевым
 241 среднее значение температуры за два 40-летних периода (рис. 4B,C). За первые четыре десятилетия
 242 имеющихся данных MXD в лесотундре с 1929 по 1969 год, корреляции $r > 0,4$ ($P < 0,01$)

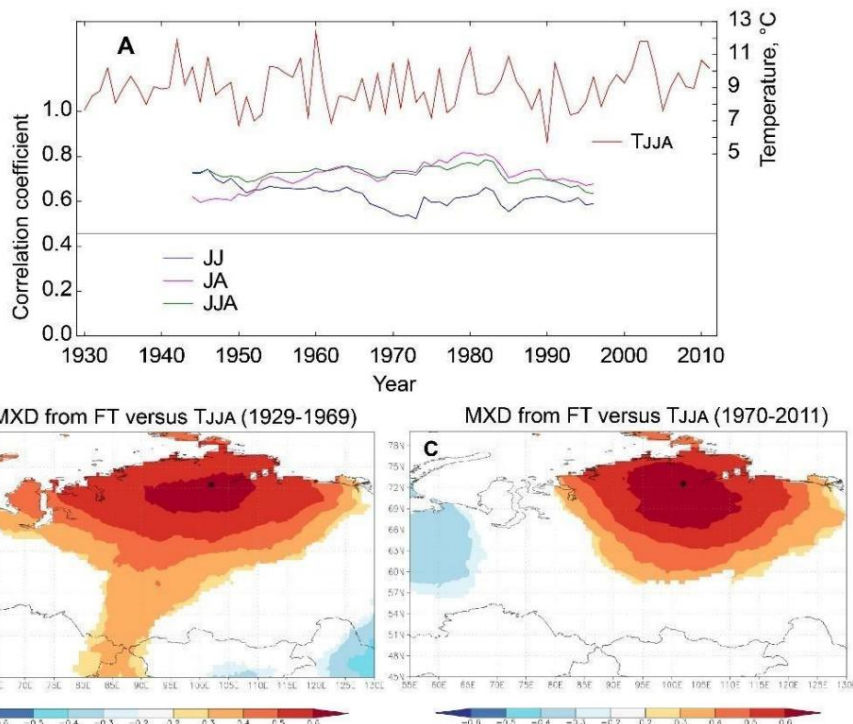
243 достигают 60° с.ш. на юге и распространяются между Обской губой на северо-западе и

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

245 статистически значимых (корреляции хронологии FT немного снизились на западе, но

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

247247



248

249 Рис. 4. Среднее значение температуры JJ в Хатанге (красный) с 31-летним окном корреляций

250 между максимальной плотностью поздней древесины (MXD) стандартной хронологии и летним месяцем

251 среднее значение температуры на участке лесотундры FT (А). Соответствующие поля корреляции с 1929 г. –

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

253253

254 Текущие корреляции MXD из ST со средними значениями температуры летом и MJJA

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

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

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

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

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

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 средние значения температуры $r > 0,4$ ($P < 0,01$) для южной тайги хронология MXD распространяется между

263 45°N и 75°N с юга на север (рис. 5B). Область с высокими корреляциями простирается от 65°E

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

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

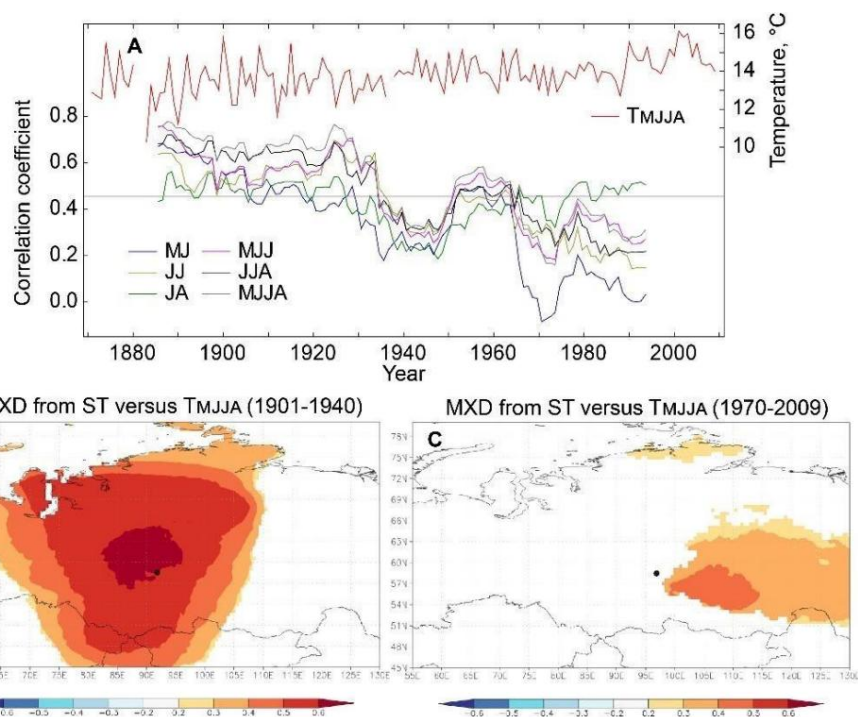
266 к востоку от места исследования ST (рис. 4C).

267 Удивительно, но корреляция с ежемесячными и сезонными суммами осадков не дала результатов.

268 идентифицируют любое значимое ($P < 0,01$) положительное влияние осадков на MXD в течение недавнего

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

270270



271

272 Рис. 5. Средние значения температуры МЈЈА в Енисейске (красный) с 31-летним окном, прослеживающим
 273 корреляции между стандартной хронологией максимальной поздней плотности древесины (MXD) и средними
 значениями температуры теплых месяцев (с мая по август) на участке южной тайги ST (A). Соответствующие поля
 корреляции с 1901 по 1940 гг. (B) и с 1970 по 2009 гг. (C). Горизонтальная линия указывает уровень значимости $P < 0,01$.

277

278

279

280

281 Обсуждение

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

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

284 хронологии TRW и MXD из сурового климата на северной границе леса в сравнении с лесами

285 годовичных колец в более мягких условиях не удивительны (Фриттс, 1976). Сезонный рост деревьев в

286 север Сибири 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 Харук и др., 2023с), что также подтверждается нашими результатами. Напротив, влияние климата

290 о деревьях, растущих в условиях более благоприятного температурного режима и гидроклимата южной тайги

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

292 Однако MXD с южнотаежного участка ST содержат удивительно сильный температурный сигнал

293, подтверждающие превосходство этого параметра годовичных колец для дендроклиматологии не только на высоких

294 широты и высоты (Бриффа и др., 1988, 2004; Бюнтген и др., 2024), но и для условий

295 с меньшими климатическими ограничениями роста деревьев на юге Сибири.

296 TRW в лесотундре в целом следует летней динамике 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 в течение двух ~ 40-летних периодов. Отсутствие

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

300 1990-е годы можно считать единственным свидетельством DP в наших сайтах исследования FT. Однако у нас есть

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

302 наиболее поразительное повышение температуры. Напротив, запись 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 DP

305 (D'Arrigo et al., 2008). Более того, пространственный охват значимых корреляций также имеет решающее значение

306 уменьшилось в пространстве (см. рис. 5В и 5С). Эти сдвиги в реакции роста деревьев на температуру

307 между участками исследования из разных зон растительности бореальных лесов демонстрируют пространственные
308 неоднородность в силе и времени ДП в пределах центральной Сибири. Пространственная неоднородность
309 DP ранее был описан в литературе (Briffa et al., 1998; D'Arrigo et al., 2008). Однако в
310 В этом исследовании мы приводим доказательства существования ДП в южной таежной зоне Сибири, которая расположена
311 >1600 км к югу от лесотундры. Это открытие частично противоречит более ранней литературе, утверждающей, что
312 Явление DP в основном выражено в высоких широтах и в меньшей степени в низких широтах.
313 (Briffa et al. 1998; Cook et al. 2004; Büntgen et al. 2008, 2016, 2024).

314 Возможные причины возникновения ДП уже были ранее указаны и проверены в
315 литературы (D'Arrigo et al., 2008; Frank et al., 2007; Esper and Frank 2009). Эти причины могут
316 значительно различаются в зависимости от региона, но неспособность данных годовичных колец следовать за температурой
317 увеличение было указано как одна из самых замечательных причин. В нашем северном регионе исследования,
318 летняя температура все еще в целом $< 12^{\circ}\text{C}$. Это, вероятно, ниже порога, выше которого
319 Температура перестает оказывать прямое лимитирующее действие на рост деревьев (Ваганов и др., 2006) и не может вызывать ДП.
320 С другой стороны, ранее было показано, что существуют явные доказательства существования ДП на региональном уровне.
321 чешуя на севере центральной Сибири (Бриффа и др., 1998; Кирдянов и др., 2020), что, вероятно,
322 будет инициировано затемнением из-за выбросов SO_2 от промышленности Норильска и междугородних
323 атмосферный перенос из более низких широт (Кирдянов и др., 2020; Бюнтген и др., 2021б).
324 прямых и косвенных эффектов загрязнения воздуха на растительность в регионе было также обнаружено
325 Панюшкина и др. (2016) и Харук и др. (2023а,б). Однако относительно небольшой DP в нашем
326 северных участков исследования неудивительно, поскольку ранее было показано, что ДП может быть участком-
327 специфических явлений даже в пределах одного региона (Бюнтген и др., 2021а, 2024; Инь и др., 2021).
328 Это позволяет нам рассматривать годовичные кольца деревьев как ценный показатель летних температур в условиях
329 точный выбор мест и параметров годовичных колец.

330 В южной тайге летняя температура повышалась в течение всего периода
331 инструментальная запись с 1870-х годов (рис. 1). Принимая во внимание относительно высокие средние летние
332 температуры до $19,4^{\circ}\text{C}$ в 2012 году и в целом $> 15,5^{\circ}\text{C}$ в течение 31-летних периодов, мы

333 можно предположить, что даже небольшое потепление может привести к тому, что температура достигнет порогового значения, 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

336 ST site был создан в районе, населенном людьми. Хотя мы выбрали место, которое

337 удалены от населенных пунктов и не имеют следов прямого антропогенного или природного воздействия,

338 не может исключить влияние некоторых из этих факторов на рост деревьев в прошлом. Таким образом, более широкий

339 Изучаемая территория подверглась интенсивной вырубке в 20 веке (Миронов 2009; Данилин и Кроу 2008), что

340 вызванных изменений в региональном гидрологическом режиме (Онучин и др., 2017; Вэй и др., 2022; Джонс

341 и др., 2022; Чжао и др., 2021), дополнительно влияя на биогеохимию и динамику лесной экосистемы,

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

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

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

345 де Андрес и др., 2022, Чебакова и др., 2022). Поэтому необходимы дополнительные данные о месте и региональном лесном хозяйстве.

Для того, чтобы сделать правильный вывод о причинах, вызвавших ДП в нашем исследовательском центре, необходимо 346 историй болезни.

347 в первой половине 20 века.

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

349 неоднородность по силе ДП и возможные причины возникновения этого явления. При этом

350 раз, недавнее исследование продемонстрировало доказательства регионального масштаба DP в лесах высоких широт

351 пояс в пределах той же области (Кирдянов и др., 2020). Эти два в некотором роде 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 годовых колец. Он может только

355 может быть достигнуто с помощью точного изучения каждого участка с использованием недавно собранных и обновленных данных о годовых кольцах деревьев

356 удаленных мест в бореальных лесах. Эти данные также срочно необходимы для дальнейшего изучения эффекта

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

358 Бланко и др., 2024).

359359

360 Выводов

361 Наши результаты демонстрируют «проблему расхождения» в хронологиях поздней древесины с максимальными годовыми кольцами

362 из двух отдаленных и экологически различных растительных зон в бореальных лесах центральной

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

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

365 пригодности тщательно отобранных древесных колец с севера центральной Сибири для

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

367 может иметь значительные последствия для динамики круговорота углерода и воды в условиях более теплого климата

368 и должен быть исследован с использованием более плотной сети обновленных данных о годовых кольцах деревьев.

369369

370 Благодарности: Поддержано 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 FSRZ-2023-0007

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

374 (23-08049S) и расширенный грант ERC MONOSTAR (AdG 882727).

375375

376 Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

377377

378 Ссылки

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

380 Регион. Наука, Новосибирск, 208 с.

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

382 ВМ, Jacobu, GC, Cook, ER, 2013. Летние температуры, реконструированные по годовым кольцам деревьев

383 Северо-запад Северной Америки в течение последних девяти столетий. J. Clim. 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 в прошлом тысячелетии по годичным кольцам деревьев:
- 389 Часть II, пространственно-разрешенные реконструкции. *Quat. Sci. Rev.* 163, 1–22.
- 390 <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2017.02.020>.
- 391 Анисимов О.А., 2007. Возможные обратные связи таяния вечной мерзлоты с глобальной климатической системой
- 392 через метан эмиссия. *Окружающая среда. Рез. Латыш.* 2, 045016.
- 393 <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/2/4/045016>
- 394 Анисимов, О., Ренева, С., 2006. Вечная мерзлота и меняющийся климат: российская перспектива.
- 395 *Амбио* 35, 169–175. <https://www.jstor.org/stable/4315715>.
- 396 Бьорклунд Дж., Сефтиген К., Стоффель М., Фонти М.В., Коттлоу С., Франк Д.К., Эспер Дж., Фонти П.,
- 397 Гусс Х., Грудд Х., Гуннарссон Б.Е., Нивергельт Д., Пелиццари Э., Каррер М., фон Аркс,
- 398 Г., 2023. Анатомия годичных колец Фенноскандии 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, ТР, Шмидт, Н. М., Лунд, М., Парментье, Ф.-Дж. 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 показатели изменения климата Арктики: 1971–2017. *Environ. Res. Lett.* 14, 045010.
- 404 <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/aaaf1b/meta>.
- 405 Бриффа, К.Р., Джонс, П.Д., Швайнгрубер, Ф.Х., 1988. Летние температурные режимы в Европе:
- 406 Реконструкция 1750 г. н.э. на основе индексов 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 температурные выводы из деревьев
- 409 Кольца: Обзор. *Global Planet. 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 ксеногенез у лиственницы даурской *Larix gmelinii* (Rupr.) Rupr., произрастающей на вечномерзлых почвах
- 413 Средняя Сибирь. *Рус. ж. эк.* 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 расхождение колец в европейских Альпах. *Glob. Chang. Biol.* 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 общественные изменения в позднеантичный период
- 420 Малый ледниковый период с 536 по 660 год нашей эры. *Nat. Geosci.* 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., Миглан 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 на климатические реконструкции на основе годовых колец деревьев. *Nat. Commun.*
 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., Риз, Г., 2023. Глобальные исследования изменений требуют международного сотрудничества. *Sci. Total*
 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 Западный средиземноморский регион беспрецедентен со времен средневековья. *Глобальная планета. Изменение*
 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 Вильмкинг, М., 2021. Глобальное затухание связи температуры и роста в альпийских и полярных широтах
 445 линии деревьев. *Glob. Chang. Biol.* 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 сокращения/отмирания темных хвойных лесов в Северной
 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 вне тропиков Северного полушария
 451 изменчивость за последние 1000 лет. *Quat. Sci. Rev.* 23, 2063–2074.
 452 <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2004.08.013>.
- 453 Д'Арриго, Р., Уилсон, Р., Липерт, Б., Керубини, П., 2008. О «проблеме расхождения» в
 454 Северные леса: обзор годовых колец и возможные причины. *Global Planet.*
 455 *Изменение* 60 (3–4), 289–305. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2007.03.004>.

- 456 Данилин, И.М., Кроу, Т.Р., 2008. Великий Сибирский Лес: Проблемы и Возможности
 457 Масштаб., в: Лафортееца, Р., Санези, Г., Чен, Дж., Кроу, ТР (ред.), Модели и процессы в
 458 Лесные ландшафты. Springer, 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 Дэви, НК, Якоби, ГЦ, Уайлс, ГЦ, 2003. Изменчивость бореальной температуры, выведенная из
 461 Данные о максимальной плотности поздней древесины и ширине годовых колец, регион горы Врангель, Аляска.
 462 Кват. Рез. 60(3), 252-262. <https://doi.org/10.1016/j.yqres.2003.07.002>.
- 463 де Андрес, Э.Г., Шестакова, Т.А., Шолтен, Р.К., Делькур, С.Дж.Ф., Горина, Н.В., Камареро, Дж.Дж.,
 464 2022. Изменения в синхронности роста деревьев и устойчивости в лесах кедрового стланика обыкновенного
 465 модулируется динамикой пожара и экогидрологическими условиями. Сельское хозяйство. Лесная метеорология. 312,
 466 108712. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2021.108712>.
- 467 Эспер, Дж., Фрэнк, Д., 2009. Ошибки расхождения в исследовании годовых колец деревьев. 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. Glob. Chang. Biol. 16, 386–
 471 398. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.01913.x>.
- 472 Франк Д., Бюнтген У., Бём Р., Маугери М., Эспер Дж., 2007. Более тёплый ранний инструментальный инструментал.
 473 измерения по сравнению с более холодными реконструированными температурами: стрельба по движущейся цели. Quat.
 474 Sci. Rev. 26, 3298–3310. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2007.08.002>.
- 475 Фриттс, ХК, 1976. Годичные кольца и климат. Acad. Press, Лондон, Нью-Йорк, Сан-Франциско, 576
 476 стр.
- 477 Готье С., Бернье П., Куулувайнен Т., Швиденко А.З., Щепашенко Д.Г., 2015. Бореальный.
 478 лес здоровье и глобальный 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 Влияние на биомассу и состав лесов в южной и центральной Сибири. Экологическое приложение 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., Фонти П., 2022. Текущая информация.
 485 Сибирское отопление беспрецедентно за последние семь тысячелетий. Нац. Сообщ. 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 высокого уровня CRU TS
 488 разрешение сетка многомерный климат набор данных. Научные данные 7, 109.
 489 <https://doi.org/10.1038/s41597-020-0453-3>.

- 490 Холлоуэй, Дж. Э., Левкович, АГ, 2020. Полвека прерывистого существования вечной мерзлоты
491 и деградация в западной Канаде. *Permafr. Periglac. Процесс.* 31 (1), 85–96.
492 <https://doi.org/10.1002/ppp.2017>.
- 493 Иттер, М.С., Д'Оранжвилль, Л., Доусон, А., Нишоу, Д., Дашен, Л., Финли, АО, 2019.
494 Рост бореальных деревьев демонстрирует экологическую память десятилетнего масштаба к засухе и насекомым
495 дефолиация, но нет отрицательной реакции на их взаимодействие. *J. Ecol.* 107(3), 1288-1301.
496 <https://doi.org/10.1111/1365-2745.13087>
- 497 Якоби, Г.К., Д'Арриго, Р., 1989. Реконструированная годовая температура Северного полушария с
498 1671 на основе данных о годовых кольцах деревьев в высоких широтах Северной Америки. *Изменение климата* 14, 39–59.
499 <https://doi.org/10.1007/BF00140174>
- 500 Якоби, ГС, Д'Арриго, Р., 1995. Ширина и плотность годовых колец деревьев свидетельствуют о климатических и потенциальных
501 изменении лесного покрова на Аляске. *Глоб. Биогеохим. Циклы.* 9, 227–234.
502 <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
504 Реакции радиального прироста лиственницы сибирской на климатические факторы в Восточном Тянь-Шане
505 Горы, северо-запад Китая. *Деревья* 29, 1673–1686. [https://doi.org/10.1007/s00468-015-](https://doi.org/10.1007/s00468-015-1248-6)
506 1248-6.
- 507 Джонс, Дж., Эллисон, Д., Ферраз, С., Лара, А., Вэй, Х., Чжан, З., 2022. Восстановление лесов и
508 гидрология. Для экологического управления 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.,
510 2021. Лесные пожары в сибирской тайге. *Амбио* 50 (11), 1953-1974.
511 <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.
513 Загрязнение и влияние климата на деревья в водно-болотных угодьях Сибирской Арктики. *Вода* 15, 215.
514 <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.,
516 Савченко А.П., Темерова В.Л. Растительность Субарктики в условиях смешанного потепления и
517 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.,
519 Шушпанов, А.С., Смит, К.Т., 2023с. Реакция лиственницы на потепление на севере Сибири. *Reg.*
520 *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., Фертников А.И., Мыглан В.С.,
522 Баринов В.В., Брауз Ю., Эспер Ю., Ильин В.А., Кнорре А.А., Корец М.А., Кукарских,
523 В.В., Машуков Д.А., Онучин А.А., Пьерматтей А., Пименов А.В., Прокушкин А.С.,
524 Рыжкова В.А., Шишкин А.С., Смит К.Т., Тайник А.В., Вильд М., Зорита Э., Бюнтген,

- 525 U., 2020. Экологические и концептуальные последствия загрязнения Арктики. *Ecology Letters* 23
 526 (12), 1827–1837. <https://doi.org/10.1111/ele.13611>.
- 527 Кирдянов, А.В., Ваганов, Е.А., Хьюз, М.К., 2007. Разделение 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 OV, Arosio, T., Bechuk, T., Siegwolf, R., Büntgen, U. 2024., Таяние вечной мерзлоты может
 532 смягчить вызванный потеплением стресс от засухи в бореальных лесных деревьях. *Sci. Total Environ.* 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., Валевич Т.О., Волков ИВ, Волкова ИИ. Воздействие
 538 Изменение окружающей среды на биоразнообразие и динамику растительности в Сибири. 2021. *Ambio*
 539 50 (11), 1926–1952. doi: 10.1007/s13280-021-01570-6.
- 540 Кнорре, А.А., Кирдянов, А.В., Ваганов, Е.А., 2006. Климатически обусловленная межгодовая изменчивость
 541 в надземной продукции в лесотундре и северной тайге центральной Сибири. *Экология*
 542 147, 86-95. <https://doi.org/10.1007/s00442-005-0248-4>.
- 543 Крейцвейзер, Д.П., Хазлетт, П.В., Ганн, Дж.М., 2008. Влияние лесозаготовок на биогеохимию
 544 Почвы бореальных лесов и экспорт питательных веществ в водные системы: обзор. *Окружающая среда. Rev.* 16, 157–
 545 179. <https://doi.org/10.1139/A08-006>.
- 546 Ли, Дж. К., Ли, Дж. Б., Ли, Т., Ау, ТФ, 2020. Отклонение роста деревьев от зимней температуры в
 547 Горы Гонга, юго-восточная часть Тибетского нагорья. *Asian Geogr.* 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, Т.В., Шмидт, Н.М., 2024 г. На пути к все более предвзятому взгляду на
 551 Изменение Арктики. *Nat. Clim. Chang.* 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, С.Л.Л., Конту, С., Лысенко, И., Сениор, 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, Х.Р.П., Первес, Д.У., 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 Глобальные эффекты землепользования на локальное 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 концентрации колец деревьев из сибирской Арктики. Tree-Ring Res. 72 (2), 67–77.
- 567 <http://dx.doi.org/10.3959/1536-1098-72.02.67>.
- 568 Пяо, С., Ван, Х., Пак, Т., Чэнь, Ч., Лянь, Х., Хэ, Ю., Бьерке, Дж. В., Чэнь, А., Цай, П.,
- 569 Тёммервик, Х., Немани, Р.Р., Минени, РБ, 2020. Характеристики, движущие силы и отзывы.
- 570 глобального озеленения. Nat. Rev. Earth Environ. 1, 14–27. [https://doi.org/10.1038/s43017-019-](https://doi.org/10.1038/s43017-019-0001-x)
- 571 0001-x.
- 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 Выбросы от пожаров 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. Франк Ринн, Гейдельберг.
- 578 Ринне К.Т., Заурер М., Кирдянов А.В., Брюханова М.В., Прокушкин А.С., Чуракова
- 579 (Сидорова), О.В., Зигвольф, РТВ, 2015. Изучение реакции игольчатых углеводов
- 580 от сибирской лиственницы до климата с использованием анализа $\delta^{13}\text{C}$ и концентрации соединений.
- 581 Клеточная среда растений, 38 (11), 2340–2352. <https://doi.org/10.1111/pce.12554>.
- 582 Швайнгрубер, Ф.Х., 1988. Древесные кольца: основы и приложения дендрохронологии. Клувер
- 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. Анализ годичных колец деревьев и подходы к моделированию дают противоположный ответ циркумбореальных
- 586 продуктивность лесов к изменению климата. Glob. Chang. Biol. 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 реки 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 Район между Енисеем и Хатангой. Труды Полярной комиссии СССР.
- 593 Академия наук 5, 1–29.

- 594 Триндаде, М., Белл, Т., Ларок, К., 2011. Изменение климатической чувствительности двух видов ели
595 через градиент влажности на северо-востоке Канады. *Dendrochronologia* 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. Дендроклиматические исследования в Урало-Сибирском регионе.
598 Субарктическая зона. Наука, Новосибирск, стр. 246.
- 599 Ваганов Е.А., Хьюз М.К., Кирдянов А.В., Швайнгрубер Ф.Х., Силкин П.П., 1999. Влияние
600 влияния выпадения и таяния снега 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 Образы прошлой и будущей среды. Экологические исследования, т. 183. Springer Science &
604 Бизнес-медиа, Берлин.
- 605 Вей, Х., Джайлс-Хансен, К., Спенсер, С.А., Ге, Х., Онучин, А., Ли, К., Буренина, Т., Ильинцев, А.,
606 Хоу, И., 2022. Лесозаготовки и гидрология в бореальных лесах: в условиях возросшего и
607 Контекст кумулятивного возмущения. *Для. Экологического управления*. 522, 120468.
608 <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120468>.
- 609 Вайскопф, С.Р., Рубенштейн, М.А., Крозье, Л.Г., Гайчас, С., Гриффис, Р., Халофски, 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 Соединенных Штатах. *Sci. Total Environ.* 733, 137782.
614 <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137782>.
- 615 Wigley, TML, Briffa, KR, Jones, PD, 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., Бабли Б.М., Бюнтген У., Эспер Дж., Франк Д., Лакман Б.,
619 Пайетт, С., Восе, Р., Янгблут, Д., 2007. Вопрос расхождения: отслеживание недавнего потепления
620 в масштабах полушария с использованием данных годовичных колец деревьев. *J. Geophys. Res.* 112, D17103.
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 местообитаний, возраста насаждений, пожаров и климата
624 о наземной продуктивности деревьев в сосновых лесах Сибири. *Физиология деревьев*. 22 (8), 537–552.
625 DOI: <https://doi.org/10.1093/treephys/22.8.537>
- 626 Инь, Х., Ли, М.-Ю., Хуан, Л., 2021. Реконструкция средней летней температуры на основе годовичных колец деревьев
627 Плотность за последние 440 лет на восточной части Тибетского нагорья. *Quat. Int.* 571, 81–88.
628 <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2020.09.018>.

629 Чжан, И., Вилькиннг, М., Гоу, С., 2009. Изменение взаимосвязи между ростом деревьев и климатом
630 в Северо-Западном Китае. Растениеводство. Экол. 201, 39–50. <https://doi.org/10.1007/s11258-008-9478-y>.

631 Чжао, М., Болл, Дж., Брукс, Э.С., 2021. Оценка влияния заготовки древесины на гидрологически
632 чувствительный области и гидрологическая реакция. Дж. Гидрол. 593, 125805.

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