



ПИСЬМО • ОТКРЫТЫЙ ДОСТУП

Арктическое усиление вызывает более раннее начало сезонный рост деревьев на северо-востоке Сибири

Ссылаться на эту статью: Александр В Кирдянов и др. 2024 Окружающая среда. Рез. Латыш. 19 114091

Посмотреть [статью онлайн](#) для обновлений и улучшений.

Вам также может понравиться

- [Гендерное неравенство в глобальной водной безопасности](#)
Каору Какинума и Ёсихидэ Вада

- [Рассказы о реке и льду: Искусство коренных народов и
водная справедливость в Арктике и Амазонке](#)
Антония Зонс, Алисса Носуорси,
Гордон М. Хики и др.

- [Измерение площади деревьев за пределами
лес: решения проблемы, основанное на природе
нулевые выборы в Южной Азии](#)
Дэвид Л. Сколе, Джей Самек, Свапан Мехра
и др.

ENVIRONMENTAL RESEARCH
LETTERS



ОТКРЫТЫЙ ДОСТУП

полученный

13 мая 2024 г.

присланный

22 сентября 2024 г.

принято к публикации

8 октября 2024 г.

опубликовано

22 октября 2024 г.

Оригинальный контент
этой работы может быть
использован в соответствии
с условиями лицензии
[Creative Commons Attribution 4.0](#).

При любом дальнейшем
распространении
данной работы необходимо
указывать автора(ов), название
работы, ссылку на
журнал и DOI.



ПИСЬМО

Арктическое усиление вызывает более раннее начало сезонного роста
деревьев на северо-востоке Сибири

Александр В Кирдянов^{1,2,3}, Алексей И Колмогоров⁴, Стефан Крузе⁵, Ульрике Херцшух⁵, Альберто Арзак³,
Людмила А Пестрякова⁴, Анатолий Н Николаев⁴, Татьяна Бебчук¹ и Ульф Бюнтген^{1,6,7}

- 1 Department of Geography, University of Cambridge, Cambridge CB2 3EN, United Kingdom
- 2 Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, Красноярск 660041, Россия
- 3 Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр СО РАН», Академгородок, Красноярск 660036, Россия
- 4 Сибирский федеральный университет, пр. Свободный, 79, Красноярск 660041, Россия
- 5 Северо-Восточный федеральный университет, ул. Белинского, 58, Якутск 677027, Россия
- 6 Полярные наземные экологические системы, Институт Альфреда Вегенера Гельмгольц-центр полярных и морских исследований, 14473 Потсдам, Германия
- 7 Department of Geography, Masarykov University, 61137 Brno, Czech Republic

Электронная почта: ak2118@cam.ac.uk

Ключевые слова: бореальный лес, изменение климата, дендрозкология, глобальное потепление, северная граница леса, годовые кольца

Дополнительный материал к этой статье доступен [онлайн](#).

Аннотация

Хотя недавнее потепление влияет на высокие северные широты с беспрецедентной скоростью, мало что известно о его влиянии на бореальные леса, поскольку наблюдения *in situ* из отдаленных экосистем в Сибири редки. Здесь мы анализируем радиальный рост и чувствительность к климату 54 лиственниц Каяндера (*Larix sibirica* Mayr.) из трех участков по всей северной границе леса в бассейне реки Омолой на северо-востоке Сибири. Три независимые хронологии ширины годовых колец охватывают 279–499 лет и демонстрируют отчетливые сигналы летней температуры. Эти записи дополнительно раскрывают доказательства достаточно раннего начала вегетационных периодов с середины 20-го века. Этот фенологический сдвиг совпадает с быстро растущими температурами мая и связанным с этим более ранним таянием снега. Наши выводы подтверждают важность высокоточных наземных измерений из отдаленных регионов Сибири для лучшего понимания того, как вызванные потеплением изменения в функционировании и продуктивности бореальных лесов влияют на динамику цикла углерода, питательных веществ и водного баланса.

1. Введение

Арктика и субарктика нагреваются с исторически беспрецедентной скоростью, которая превышает рост средней глобальной температуры в четыре раза (Rantanen et al 2022). В связи с этим усилением Арктики (Francis et al 2017, Previdi et al 2021) в зоне бореальных лесов происходят сдвиги в структуре и продуктивности растительности, расширение растительности на север, деградация вечной мерзлоты и выбросы парниковых газов в результате таяния вечной мерзлоты (Anisimov 2007, Schaefer et al 2011, Serreze and Barry 2011, Schuur et al 2015, Turetsky et al 2019). Понимание скорости и масштабов этих изменений экосистем имеет решающее значение для оценки их воздействия на глобальные циклы углерода и воды (Chapin et al 2005, Bala et al 2007).

Динамика экосистем бореальных лесов в пределах экотона северной границы леса, переход от северной тайги к безлесной тундре, в значительной степени регулируется температурами вегетационного периода (Paulsen и Körner 2014, Hansson и др. 2023). Из-за высокой климатической чувствительности перехода лес-тундра эти экотонные широко используются для мониторинга ранних реакций на изменение климата (Shiyatov 1993, Esper и Schweingruber 2004, Kullman 2007, Dufour-Tremblay и др. 2012). Хотя при изучении динамики лесов необходимо учитывать ряд биотических и абиотических факторов (Риз и др., 2019), считается, что текущее потепление является одним из основных факторов, инициирующих экспансию деревьев в тундру, а также уплотнение лесов в экотонах лесотундры (Дэнби и Хик, 2007; Фомин и др., 2020; Дайал и др., 2022; Крузе и др., 2023).

Данные о ширине годовых колец (TRW) широко используются в качестве индикатора прошлой реакции лесной экосистемы на изменение климата. В дополнение к датам установления деревьев, позволяющим идентифицировать динамику регенерации деревьев (Шиятов 1993, Эспер и Швайнгрубер 2004, Харук и др. 2006, Деви и др. 2008, Кирдянов и др. 2012, Григорьев и др. 2019), TRW предоставляют приблизительные данные о росте деревьев и продуктивности леса (Кнорре и др. 2006, Деви и др. 2008, Буриауд и др. 2015). Предыдущие исследования на основе годовых колец в лесотундре высокоширотных экотон Сибири продемонстрировали сильную зависимость роста деревьев от летней температуры (Ваганов и др. 1996, Наурзаев и др. 2002, Бриффа и др. 2004, Д'Арриго и др. 2006, Хеллманн и др. 2016, Кирдянов и др. 2018, Бюнтген и др. 2021, Хантемиров и др. 2021, 2022). Однако Бриффа и др. (1998) описали устойчивое расщепление роста деревьев с повышением летних температур в северо-восточной Сибири. Это так называемое явление «дивергенции» также наблюдалось в северо-центральной Сибири

(Кирдянов и др. 2020). Более того, есть данные, что другие факторы, связанные с климатом, могут напрямую влиять на рост деревьев в экотонах сибирской лесотундры, такие как зимние осадки (Харук и др. 2023), даты таяния снега (Ваганов и др. 1999, Кирдянов и др. 2003), заморозки в течение вегетационного периода (Гурская 2014, 2021), наводнения (Тей и др. 2019а, Меко и др. 2020) и температура и влажность почвы (Николаев и др. 2011, Фуджи и др. 2022, Харук и др. 2023, Лян и др. 2023).

Несмотря на долгую историю локальных и крупномасштабных исследований годовых колец деревьев в высоких северных широтах, остаются неопределенности относительно того, насколько современные и будущие изменения климата и окружающей среды повлияют на рост деревьев и продуктивность лесов на северо-востоке Евразии.

Здесь мы изучаем радиальный рост и чувствительность к климату трех лиственничных участков в северном экотоне лесной линии в бассейне реки Омолы на севере Якутии. Хотя этот крайне удаленный регион и труднодоступен, он имеет большое значение для выявления прямого экологического ответа нетронутых лесотундровых экосистем на повышение температуры. Мы предполагаем, что рост деревьев в этом регионе напрямую зависит от арктического усиления и должен отражаться в изменении моделей радиального роста деревьев в ответ на климат.

2. Материалы и методы

Район исследования расположен на северной границе леса на северо-востоке Сибири между 70° 31' 36" с.ш. и 70° 56' 00" с.ш. вдоль 132° 47' восточной долготы (рисунок 1).

В этом регионе преобладает листопадная *Larix sibirica* Майр., которая хорошо приспособлена к произрастанию на бедных питательными веществами вечномёрзлых почвах в условиях сурового зимнего климата и короткого вегетационного периода с 24-часовым световым днем (Абаимов и др., 1997). Климат в этом регионе

резко континентальный, со среднегодовой температурой 13,3 °C (ВМО 226 609 «Юбилейная»; 1936–2022; meteo.ru) (рисунок 2). Самые теплые и самые холодные месяцы — июль и январь с месячной температурой 11,2 °C и 35,3 °C соответственно. Июнь обычно является первым месяцем с положительной средней температурой (7,2 °C), которая сохраняется до сентября (2,0 °C). Годовое количество осадков составляет 276 мм (1936–2015), из которых 42% выпадает в период с июня по август. Сезонные средние температуры значительно увеличились с 1975 года со скоростью 0,6 (P < 0,005), 0,6 (P < 0,005) и 0,5 °C/десятилетие (P < 0,05) в июне–июле, летом (июнь–август) и ежегодно, соответственно (рисунок 2), тогда как летние суммы осадков значительно снизились на 10,9 мм десятилетие 1 (P < 0,05). Важно отметить, что данные о месячных суммах осадков, доступные во Всероссийском научно-исследовательском институте гидрометеорологической информации — Мировом центре данных (ВНИИГМИ-МЦД), скорректированы на систематические ошибки согласно Богдановой и др. (2007) и Богдановой и Гавриловой (2008).

Образцы приростного керна были собраны в ненарушенных, разновозрастных насаждениях лиственницы Каяндера на трех участках вдоль трансекты север-юг в пределах экотона лес-тундра (рисунок 1). Самый северный участок N был заложен в редком лесу на первой террасе реки Омолы, единственной лесной территории в этом месте (Miesner et al 2022a, 2022b). Плотность насаждения составляла 700–800 деревьев/га, при этом деревья лиственницы достигали 6,5 м в высоту и средний DBH (диаметр на высоте дыхания 1,3 м) 10,0 см. Средний участок M представляет собой сомкнутую лесную линию с переменной плотностью насаждения от 2100 деревьев/га в редком лесу до 6400 деревьев/га в сомкнутом лесу. Деревья были до 8 м в высоту с DBH 11,3 см. Самый южный участок S был заложен

Выращивание проводилось в сомкнутом лесу со средней плотностью древостоя 5600 деревьев/га и высотой отдельных деревьев до 10 м при диаметре ствола 10,6 см. В конце июня 2014 г. средняя толщина активного слоя составляла 10–25 см, 33–35 см и 35 см на С, С и Ю соответственно.

Подробная информация о наземной растительности и параметрах насаждений была предоставлена Мизнером и др. (2022а).

В ходе отбора проб мы в основном стремились к отбору ядер из старых деревьев, которые были распределены на площади в один-два гектара. Всего было отобрано от 16 до 21 дерева на участке, при этом возраст самых старых деревьев составлял от 279 (участок N) до 499 (S), а средняя длина сегмента (MSL) варьировалась от 126 (N) до 281 (S) лет (таблица 1).

Все приращения ядер были высушены на воздухе и смонтированы.

размещены на деревянных подставках, поверхность которых вырезана и окрашена мелом для увеличения видимости.

возможности определения границ годовых колец. TRW измеряли на измерительной системе LINTAB (RINTECH eK, Гейдельберг, Германия). Индивидуальные серии TRW были перекрестно датированы с использованием TSAP-Win (Rinn 2003), а точность перекрестного датирования была статистически проверена с помощью COFESHA (версия 6.02P). Индивидуальные

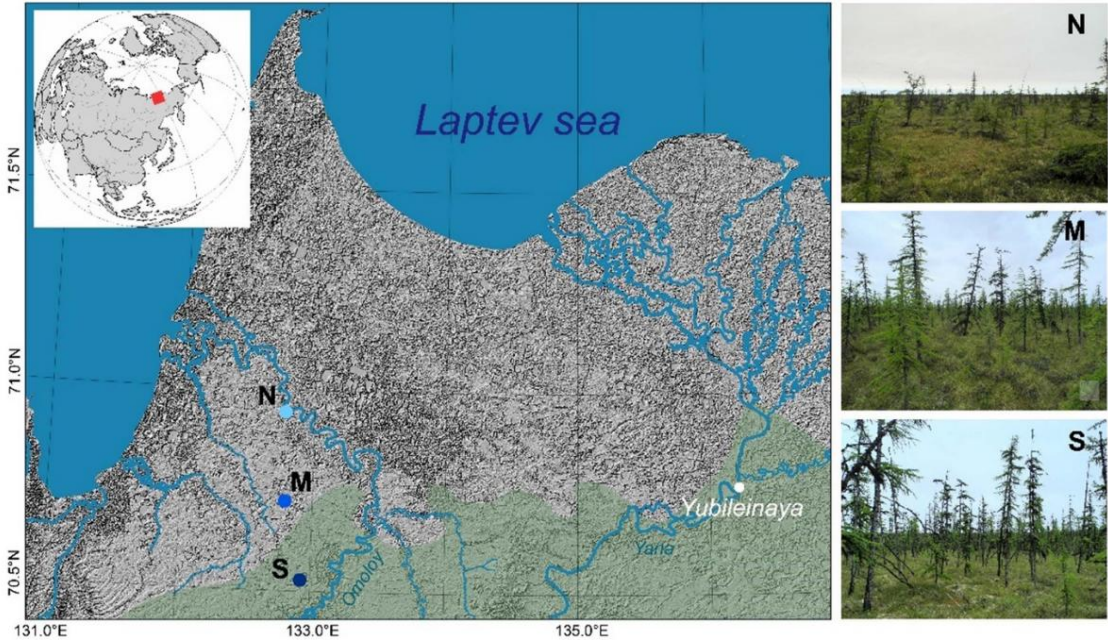


Рисунок 1. Расположение точек взятия годовичных колец (три синих круга разной интенсивности) и метеостанций в Юбилейная (белый круг). Зеленая заливка относится к зоне тайги. Верхняя левая врезка помещает исследуемый регион в контекст Северного полушария. На трех фотографиях справа показаны три места отбора проб (C = север, S = середина, Ю = юг). Базовая карта была разработана с использованием цифровой модели рельефа (ЦМР), созданной Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) и Спутниковый снимок Sentinel, сделанный с использованием программного обеспечения QGIS.

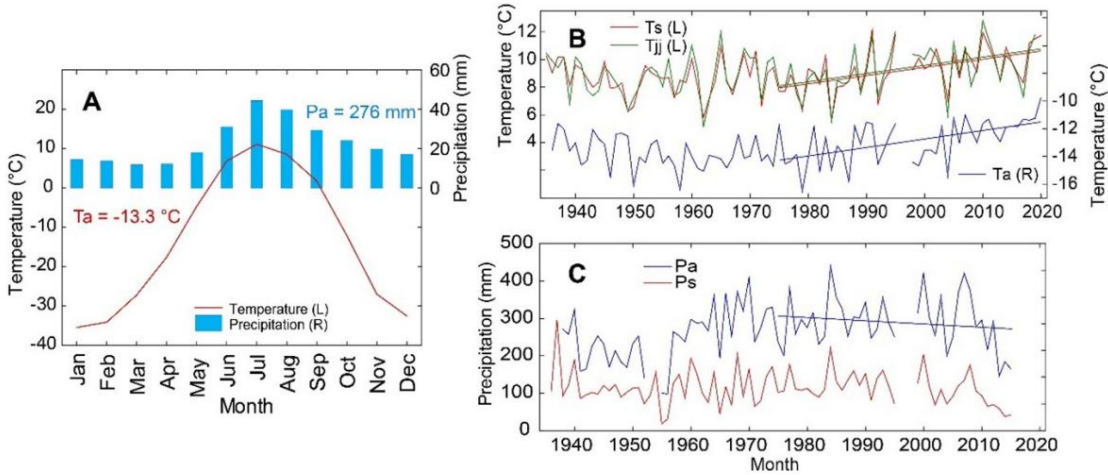


Рисунок 2. (А) Годовой климатический цикл по данным метеостанции в Юбилейной, осредненный за период 1936–2022 гг. (В) Годовой (Та), летние (Ts) и июнь-июльские (Tj) изменения температуры, а также (С) годовые (Pa) и летние (Ps) изменения осадков. Линейные Тенденции изменения температуры показывают значительный рост с 1975 года ($P < 0,05$).

Таблица 1. Характеристики хронологии (MSL = средняя длина сегмента, TRW = ширина годовичного кольца, CS = коэффициент чувствительности; Rbar = межсерийная корреляция, EPS = выраженный популяционный сигнал).

Участок N серии Период CE MSL Среднее TRW, мм Среднее TRW >150 лет, мм Среднее CS Среднее Rbar Среднее EPS							
N	21	1736–2014 126	$0,56 \pm 0,30$	$0,12 \pm 0,06$	0,397	0,415	0,905
M	17	1740–2014 190	$0,27 \pm 0,20$	$0,12 \pm 0,06$	0,415	0,538	0,946
C	16	1516–2014 281	$0,21 \pm 0,15$	$0,10 \pm 0,05$	0,408	0,469	0,914

Примечание: Все статистические данные, за исключением среднего TRW и среднего TRW >150 лет, были рассчитаны для стандартизированных хронологий.

Серия TRW была стандартизирована с помощью кубических
сглаживающих сплайнов с 50%-ным срезом частотной характеристики на уровне
отдельных серий длин. Двувесовой надежный
средние значения отдельных серий измерений были
использованы для получения безразмерного индекса TRW
хронологии (Кук 1985). Стандартная версия

хронологий был выбран для дальнейшего анализа, чтобы сохранить потенциальную долгосрочную изменчивость для сравнения с различными климатическими параметрами. Коэффициент чувствительности (CS), средняя межсерийная корреляция (R_{bar}) и выраженный популяционный сигнал (EPS) были рассчитаны с использованием последней версии программного обеспечения ARSTAN (www.geog.cam.ac.uk/research/projects/dendrosoftware/, последний доступ 25 марта 2024 г.).

Для определения наиболее важных климатических факторов, контролирующих радиальный рост деревьев, стандартные хронологии TRW были сопоставлены с инструментальными записями месячных и сезонных средних температур и сумм осадков с ближайшей метеостанции Юбилейная за общий период 1936–2014 гг. Были рассчитаны парные корреляции, которые игнорируют отсутствующие значения климатических данных. Для оценки временных изменений в связях между хронологиями TRW и климатическими записями были рассчитаны коэффициенты корреляции Пирсона за 1936–

1974 и 1975–2014, а также с использованием скользящих 25-летних окон. Для устранения влияния климатических данных тенденции в росте деревьев в ответ на климат, мы сопоставили остаточные хронологии индекса TRW с климатическими записями без тренда (Ols et al 2023). Мы также оценили временные сдвиги в датах таяния снега, доступных для метеостанция Юбилейная.

3. Результаты

3.1. Радиальный рост

деревьев Деревья на исследуемых участках характеризуются низкой скоростью радиального роста ствола, и до 3,3% годовых колец могут локально отсутствовать (M) (таблица 1). Средний TRW увеличивается от $0,21 \pm 0,15$ мм (S) до $0,56 \pm 0,30$ мм (N) с уменьшением длины хронологии и MSL. Средняя скорость роста деревьев на зрелой стадии (возраст камбия >150 лет), когда возрастная тенденция радиального роста деревьев наименее выражена, схожа среди участков, с несколько более низкими значениями на S. Все индексные хронологии характеризуются высокими CS >0,3 и R_{bar} >0,4. Средний EPS (рассчитанный для 50-летних периодов, сдвинутых на 25 лет) составляет >0,9, по крайней мере, с 1840 года. Эти статистические данные указывают на сильный общий сигнал в отдельных сериях TRW с каждого участка и подтверждают, что глубина образца достаточна для дендроклиматического анализа на всех участках исследования.

Три хронологии TRW демонстрируют высокую согласованность межгодовых и многодесятилетних колебаний (рисунок 3).

Коэффициент корреляции за период с 1809 года, с данными по крайней мере для трех деревьев в каждой хронологии, варьируется от 0,70 ($P < 0,001$) для самых удаленных участков N и S до 0,85 ($P < 0,001$) для двух южных участков M и S. С 1900 года самые высокие индексы TRW наблюдались в 1930-х и начале 1940-х годов, за которыми следовало постепенное снижение TRW до 1970–1980-х годов и последующее увеличение роста (рисунок 3).

3.2. Климатическая реакция TRW

Анализ реакции роста на климат локальных хронологий с 1936 года показывает, что индексы TRW на самом северном участке N значительно положительно коррелируют со средними температурами июня и июля ($P < 0,01$) (рисунок 4(A)). Данные TRW с двух других участков демонстрируют положительную связь со средними температурами июня ($P < 0,001$). Все три локальные хронологии положительно коррелируют со средними температурами лета (июнь–июль и июль–август) (r варьируется от 0,26 до 0,42, $P < 0,05$). Самая сильная корреляция обнаружена для самого южного участка S с температурой июня ($r = 0,56$, $P < 0,001$). Корреляции стандартных хронологий TRW с наблюдаемыми ежемесячными и сезонными осадками (рисунок S1(A)) и остаточных хронологий TRW с осадками без тренда (рисунок S1(B)) не показывают каких-либо последовательных результатов между участками.

Подробный дендроклиматический анализ с температурами показывает, что TRW в основном зависит от температур июня и JJ в период 1936–1974 гг. ($P < 0,05$) (рисунок 4(B)). Хронология TRW с самого северного участка N значительно ($P < 0,05$) коррелирует также с температурой JJ. Однако картина корреляции значительно меняется для более позднего периода с 1975 г. (рисунок 4(C)). Температура июня по-прежнему является наиболее важной климатической переменной для роста деревьев на всех трех участках ($P < 0,05$), а N продолжает зависеть от температур июля ($P < 0,05$). Однако N и M также показывают сильную зависимость ($P < 0,01$) от температуры мая. В случае сезонных температурных средних корреляции остаются статистически значимыми только для N и S ($P < 0,05$). Важно отметить, что корреляции остаточных хронологий TRW с температурными переменными с исключенным трендом показывают схожую картину с возрастающей значимостью температуры мая для N и M в период 1936–1974 гг. (рисунок S2).

Текущий корреляционный анализ связи роста и климата показывает непрерывно растущее влияние температур мая на TRW на всех трех участках (рисунок 5(A)). На участке N корреляции становятся значимыми в период 1959–1983 гг. и остаются высокими с тех пор. На участках M и S температура мая важна только в течение короткого интервала, причем первые значимые корреляции наблюдались в период 1987–2011 гг. Июньские температуры значительно влияют на радиальный рост деревьев на всех трех участках в течение большей части периода с 1936 г., с в целом более высокими корреляциями до $r = 0,77$ ($P < 0,001$) на S (рисунок 5(B)).

Роль температуры июля колебалась на уровне значимости $P < 0,05$ на N, тогда как на M и S она в основном незначительна на протяжении всего периода (рисунок 5(C)).

Удивительно, но текущие корреляции с месячными суммами осадков не демонстрируют повышенного положительного влияния осадков в период повышения температуры (рисунок S4). Напротив, хронологии TRW значительно ($P < 0,05$) отрицательно коррелируют с июньскими суммами осадков (рисунок S4(B)) в последние десятилетия. Наблюдаются положительные корреляции

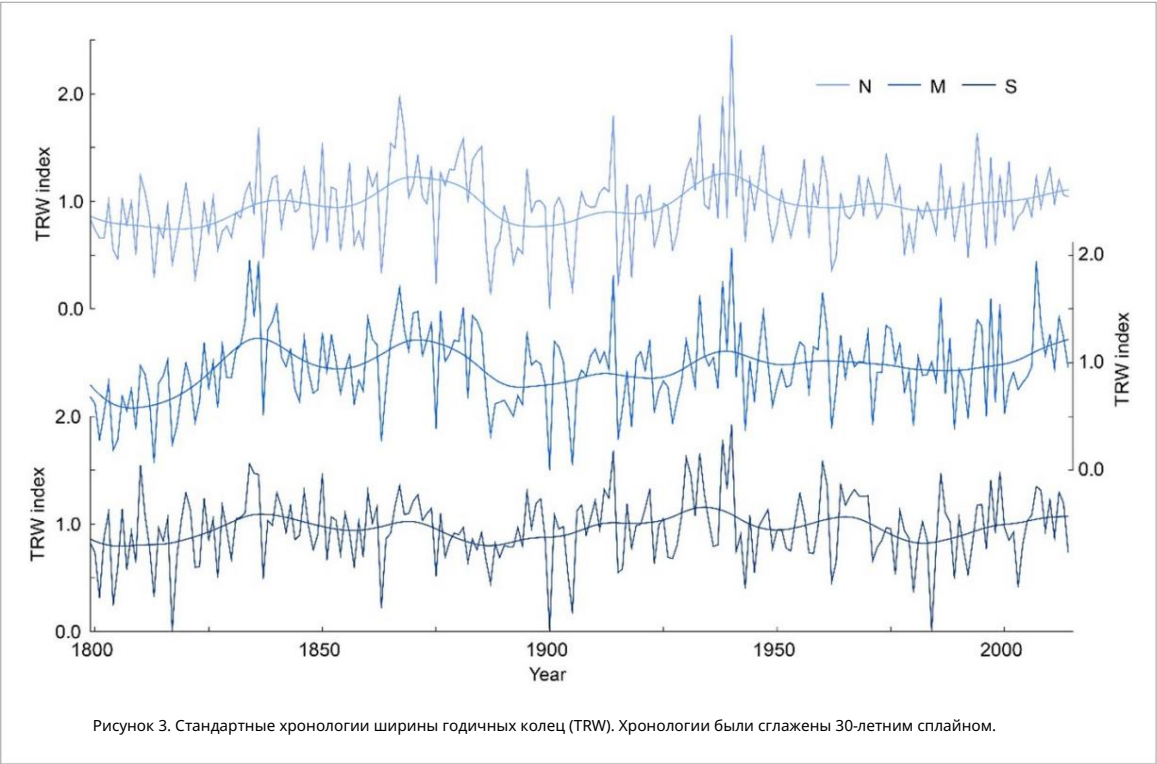


Рисунок 3. Стандартные хронологии ширины годичных колец (TRW). Хронологии были сглажены 30-летним сплайном.

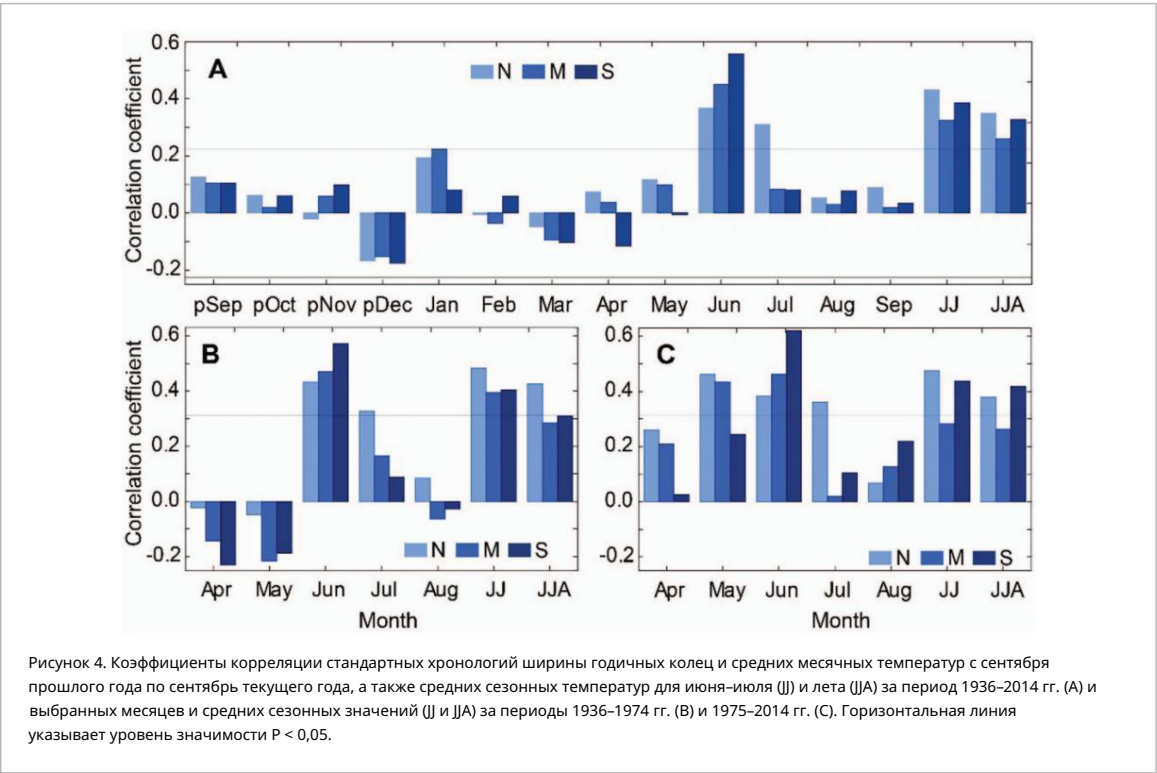


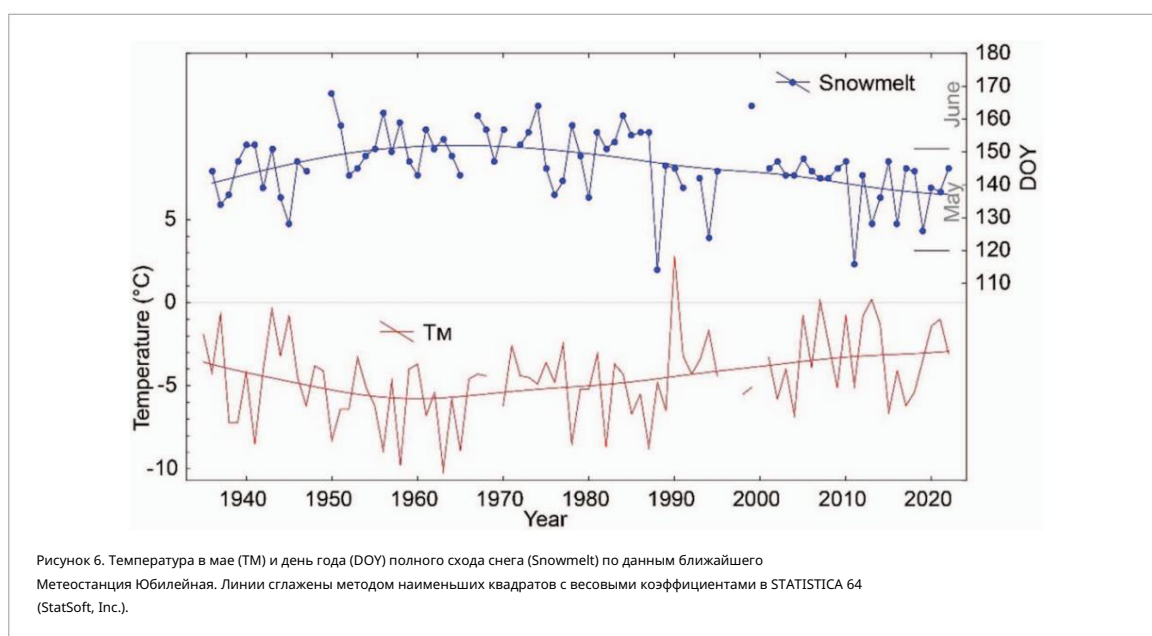
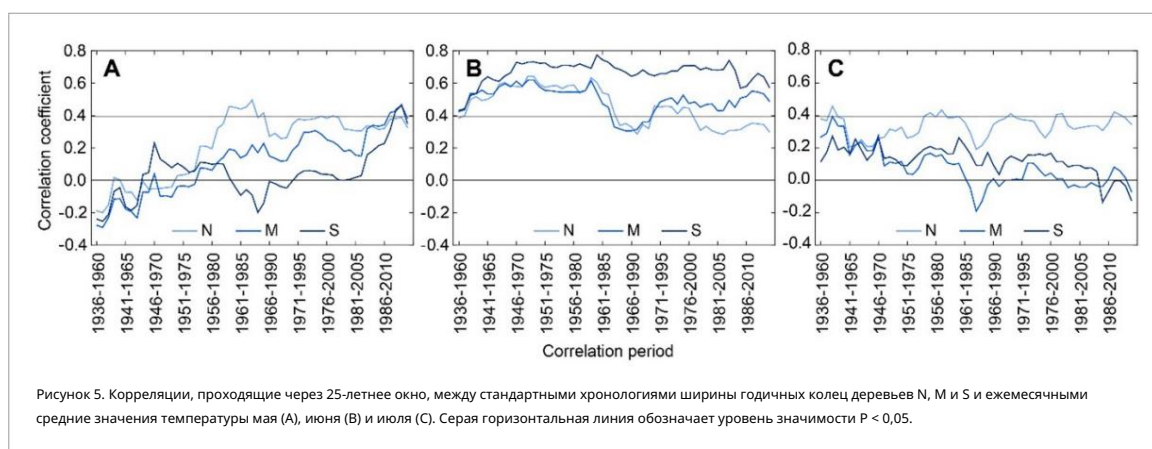
Рисунок 4. Коэффициенты корреляции стандартных хронологий ширины годичных колец и средних месячных температур с сентября прошлого года по сентябрь текущего года, а также средних сезонных температур для июня–июля (JJ) и лета (JJA) за период 1936–2014 гг. (A) и выбранных месяцев и средних сезонных значений (JJ и JJA) за периоды 1936–1974 гг. (B) и 1975–2014 гг. (C). Горизонтальная линия указывает уровень значимости $P < 0,05$.

с осадками в июле (рисунок S4(C)) и августе (рисунок S4(D)) в течение некоторых интервалов в течение первой половины анализируемого периода с 1936 года. Текущие корреляции хронологий остаточного индекса TRW со средними ежемесячными температурами с исключенным трендом (рисунок S3) и суммами осадков (рисунок S5) демонстрируют схожие тенденции, с единственным существенным отличием в виде значительных отрицательных корреляций между хронологией остаточного индекса TRW из N

Осадки в июле, начиная с периода 1973–1997 гг. (рисунок S5(C)).

3.3. Изменения климатических параметров, определяющих начало роста

деревьев Для выявления факторов, приводящих к смещению температурной зависимости роста деревьев на более ранние сроки, исследовалась динамика температур мая и июля за весь период (рисунок 6). Средняя температура мая



природа демонстрирует четкую положительную тенденцию конец 1950-х годов. В течение последних десятилетий температура мая была в среднем выше, чем за любой другой десятилетний интервал за период инструментальных метеорологических наблюдений и увеличилась со среднего десятилетнего значения $6,8^{\circ}\text{C}$ в период 1956–1965 гг. до

$2,0^{\circ}\text{C}$ в 1995–2014 гг. Важно, что положительные ($>0^{\circ}\text{C}$)

Майские температурные значения начали появляться в последнее время десятилетия и были зафиксированы в 1990 ($2,8^{\circ}\text{C}$), 2007

($0,1^{\circ}\text{C}$) и 2013 ($0,2^{\circ}\text{C}$). Напротив, даты схода снега демонстрируют тенденцию к снижению от

1960-е годы, что свидетельствует о переходе к более раннему таянию снега 154-й день года (DOY) как среднее значение для 1949–

Период с 1958 года по 135-й год рождения в 2011–2020 годах.

4. Обсуждение

Радиальный рост деревьев в экотоне северной границы леса в Сибири обычно крайне низка из-за суровых климатических условий, которые синхронизируют рост деревьев не только в пределах отдельных участков, но и на расстояниях в несколько сотен километров (Ваганов и др. 1996, Эспер и др. 2010, Хеллманн и др. 2016, Шестакова и др.

2016, Бюнтген и др. 2021, Хантемиров и др. 2021, 2022). Низкий среднегодовой прирост, высокий межсерийный корреляции роста деревьев в нашем регионе исследования и результаты дендроклиматического анализа подтверждают важность летней температуры как основного климатический фактор, который модулирует межгодовую изменчивость радиального прироста деревьев в северной Якутии, с ранний летний период (июнь), показывающий самый высокий воздействие. Эти результаты совпадают с предыдущими выводами для Сибири (MacDonald et al 1998, Hughes et al 1999, Ваганов и др. 1999, Кирдянов и др. 2003, 2018, Хантемиров и др. 2022, Колмогоров и др. 2023), а также а также для более обширной территории Евразии и Северного Полушария (Briffa et al 2004, 2013, St. George 2014, Хеллманн и др. 2016, Деви и др. 2020). Период вегетационного периода со значительными корреляциями между TRW и месячной температурой может значительно варьироваться в зависимости от региона от одного до четырех-пяти месяцев (Бюнтген и др. 2021), но температура в начале лета обычно демонстрирует более высокую корреляцию, особенно в Сибири (Ваганов и др. 1999, Кирдянов и др. 2018). Быстрое начало камбиальной активности дерева после таяние снега и суточное повышение температуры выше

физиологически определенный порог в начале вегетационный период является ключевой адаптацией границы леса лиственница в Сибири (Ваганов и др. 1999, Кирдянов и др. 2003). Деревья используют преимущества 24-часового фотопериода, что позволяет им завершить формирование годичных колец в течение нескольких недель короткого и холодного вегетационного периода (см. данные по сезонному радиальному росту деревьев в более южном месте, но с коротким сезонным ростом в Брюханова и др. 2013, Ринне и др. 2015a, 2015b). Однако ни критический температурный порог, ни сроки вегетационных периодов лиственницы на северной границе леса в настоящее время известны несмотря на важность этих параметров для понимания физиологии лиственничных деревьев и прогнозирования будущих изменений растительности в бореальной зоне в Сибирь. Данные дистанционного зондирования (Buitenwerf et al 2015, Дронова и Таддео (2022) и рост годичных колец деревьев моделирование (Ваганов и др. 1999, 2006, Шишов и др. 2016, Канг и др. 2023, Шишов и др. 2023) могут предоставить грубые оценки этих значений, но требуют выезда на место проверка.

Наши хронологии TRW демонстрируют недавний сдвиг зависимости роста деревьев от температуры на более ранние даты, которые могут указывать на более раннее начало вегетационного периода (Gao et al 2022). Этот сдвиг совпадает с временные изменения двух климатических параметров, которые непосредственно влияют на сроки наступления вегетационного периода: таяние снега и температура до и во время ранний вегетационный период (Ваганов и др. 1999, Кирдянов и др. 2003, Ливенспергер и др. 2016). Примерно 19 дней раньше снеготаяния и на 4,8 °C выше температура мая за последние десятилетия по сравнению с серединой 20-й век действительно может вызвать более раннюю активацию сезонного роста, который в настоящее время наблюдается в Внетропические экосистемы Северного полушария (Линдерхольм, 2006 г., Мензель и др., 2006 г., Пиао и др., 2015 г., Бюнтген и др. 2022). Удивительно, но значимые корреляции между хронологиями TRW и температурой мая в период с 1975 года были обнаружены для два северных участка N и M, но не южный участок S, что означает более медленную реакцию роста деревьев в самом южном месте к повышению температуры. К сожалению, в регионе отсутствуют инструментальные метеорологические наблюдения, которые могли бы быть репрезентативными для каждого из участков исследования и подтвердить реакцию роста деревьев на потепление в зависимости от местоположения. Единственная метеостанция Юбилейная расположена в широтном направлении в середине исследуемого трансекта, но в сомкнутом лесу экотона границы леса, что соответствует участку S. Однако из-за близости участки и равнинный рельеф исследуемой территории мы можем считать региональный климат довольно однородным, с несколько более низкой температурой воздуха на северные участки.

Специфичность климатического реагирования TRW на местности потепление, наблюдаемое в исследуемом регионе, является известное явление для бореальной зоны вечной мерзлоты:

Деревья в географически близких местах могут демонстрировать различную реакцию на климат из-за местной почвы. термогидроклиматические условия (Кирдянов и др.) 2013, Брюханова и др. 2015, Кирдянов и др. 2024). Внутривидовая и межвидовая конкуренция также может выступать в качестве фактор, влияющий на динамику радиального роста деревьев и климатическая реакция, поскольку температурные условия почвы, толщина активного слоя и доступность питательных веществ во многом зависят от плотности древостоя и почвы растительность (Браун 1966, Шур и Йоргенсон 2007, Инь и др. 2017 г., Федоров и др. 2019 г., Кнорре и др. 2019, Stuenzi et al 2021). Деревья на участке S склонны к самый высокий уровень конкуренции из-за самого высокого плотность деревьев и наиболее развитая наземная растительность (Miesner et al 2022a). Хотя толщина активного слоя на участке S аналогична участку M и на 10–25 см глубже чем при N, более высокая конкуренция корней за воду и питательные вещества могут объяснить замедленную реакцию TRW на потепление (рисунок 4(A)) (Wieczorek et al 2017). Плотнее Наземная растительность на участке S может удерживать и изолировать снег задерживая таяние снега и приводя к более позднему началу вегетационного периода. Однако точная причина разницы в сроках активации сезонного роста деревьев между места исследования не могут быть разрешены из-за отсутствия данные на месте.

Заявление о росте деревьев на конкретных участках реакция в зоне вечной мерзлоты может показаться противоречащей более ранним наблюдениям о высоком сходстве рост деревьев в отдаленных местах на севере Сибири (для (например, Ваганов и др. 1996, Хеллман и др. 2016). Однако подходы к отбору проб в дендроклиматологии и дендрозоологии различны (Фриттс 1976, Швайнгрубер 1996). В то время как дендроклиматические Исследования в северной Сибири часто сосредоточены на извлекая сигнал летней температуры, исследователи уделяют особое внимание прохладным и влажным участкам с аналогичные экологические условия (Ваганов и др. 1996, Хьюз и др., 1999 г., Джейкоби и др., 2000 г., Бриффа и др., 2004 г., Эспер и др. 2010 г., Бюнтген и др. 2021 г., Хантемиров и др. 2022), дендрозоология сосредоточена на понимании влияния различных экологических и климатические факторы, влияющие на рост деревьев, и отбор проб обычно проводится в экологически разнообразных экосистемах (Кирдянов и др. 2020, Гурская и др. 2021, Бухвал и др., 2023 г., Харук и др., 2023 г.).

Наше исследование подчеркивает важность данных, полученных на местах, для обнаружения текущих изменений в растительности. Такие данные особенно важны для отдаленные регионы, подверженные быстрому изменению климата, такие как север Сибири (Готье и др. 2015, Хантемиров и др. 2022). В целом, несмотря на недавние достижения в области данных сбор, анализ и моделирование (Ллойд и др. 2011, Бюнтген и др. 2014, 2021, Тей и др. 2019b, Тей и Сугимото 2020, Мизнер и др. 2022a, 2022b, Бухвал и др. 2023, Лян и др. 2023 и т.д.), способ, которым граница леса леса ведут себя в северо-восточной Сибири по-прежнему плохо понял. Необходимо приложить достаточно усилий, чтобы получить

IOP Publishing	Письмо по охране окружающей среды 19 (2024) 114091	А.В. Кирдянов и др.
полевые данные in situ и получение знаний, например, об активности камбия деревьев и точных сроках вегетационного периода, продуктивности растительности и взаимодействии растений с вечной мерзлотой, чтобы определить адаптационный потенциал деревьев, растущих в экстремальных условиях окружающей среды, которые в настоящее время быстро меняются.	Последствия крупномасштабной вырубки лесов . Труды Национальной академии наук. 104 6550–5	Богданова Е.Г., Гаврилова С.Ю. 2008 Исправление неоднородности временного ряда осадков, вызванной заменой экранированного дождемера «Нифер» на осадкомер Третьякова // Метеорология и гидрол. 33 525–36
5. Заключение	Богданова Е.Г., Ильин Б.М. и Гаврилова С.Ю. 2007 Продвинутый Методы коррекции измеренных осадков и результаты их применения в полярных районах России и Северной Америки . Метеорология и гидрология 32 229–44 Буризауд О., Теодосиу М., Кирдянов А.В. и Вирт К. 2015 Влияние плотности древесины на ежегодную оценку продуктивности на основе годовичных колец и ее ошибки у ели обыкновенной Биогеонауки 12 6205–17	Бриффа КР, Мелвин ТМ, Осборн Т.Дж., Хантемиров Р.М., Кирдянов А.В., Мазепа В.С., Шиятов С.Г. и Эспер Дж. 2013 Переоценка доказательств роста деревьев и предполагаемого изменения температуры в течение нашей эры на Ямале, северо-запад Сибири Quat. Sci. Rev. 72 83–107 Бриффа К.Р., Осборн Т.Дж. и Швайнгрубер Ф.Х. 2004 Крупномасштабные температурные выводы из годовичных колец деревьев: обзор Glob. Планета. Изменение 40 11–26 Бриффа К.Р., Швайнгрубер Ф.Х., Джонс П.Д., Осборн Т.Дж., Шиятов С.Г. и Ваганов Е.А. 1998 Снижение чувствительности современных приростов деревьев к температуре в высоких северных широтах Природа 391 678–82 Brown RJE 1966 Влияние растительности на вечную мерзлоту Труды: Permafrost Int. Conf. т. 1963 стр. 20–25 Брюханова М.В., Фонти П., Кирдянов А.В., Зигвольф Р.Т.В., Заурер М., Почебыт Н.П., Чуракова (Сидорова) О.В. и Прокушкин А.С. 2015 Реакция δ 13C, δ 18O и анатомия клеток годовичных колец лиственницы Гмелина на различную глубину активного слоя почвы Дендрохронология 34 51–59 Брюханова М.В., Кирдянов А.В., Прокушкин А.С., Силкин П.П. 2013 Особенности ксеногенеза у лиственницы даурской Larix gmelinii (Rupr.) Rupr., произрастающей на вечномерзлых почвах Средней Сибири. Рус. Дж. Экол. 44 361–6 Бухвал А., Рахлевич Г., Хайм Б. и Юлс Б. 2023 Деревья в тундре: более теплый климат может не способствовать росту лиственницы стелющейся , а кустарника березы карликовой в сибирской тундре (дельта реки Лена) Сельское хозяйство и метеорология 339 109543 Буйтенверф Р., Роуз Л. и Хиггинс С. 2015 Три десятилетия многомерное изменение глобальной фенологии листьев Nat. Климат. Изменение 5 364–8 Бюнтген У и др. 2021 Влияние принятия решений на климатические реконструкции на основе годовичных колец деревьев . Национальное сообщение 12 3411 Бюнтген У., Кирдянов А.В., Хеллманн Л., Николаев А. и Тегель В. 2014 Путешествие по архиву: о палеоклиматическом значении голоцена дельты Лены 24 627–30 Бюнтген У., Пьерматтей А., Крушич П.Дж., Эспер Дж., Спаркс Т. и Кривелларо А. 2022 г. Растения в Великобритании цветут на месяц раньше в условиях недавнего потепления. Proc. R. Soc. B 289 20212456
Все данные, подтверждающие выводы этого исследования, включены в статью (и любые дополнительные файлы).	Чапин Ф.С. и др. 2005 Роль наземных экосистем в летнем потеплении Арктики Наука 310 657–60	Кук Э.Р. 1985 Подход к анализу временных рядов для годовичных колец деревьев стандартизация докторская диссертация Ламонт-Доэрти Геологическая Обсерватория, Нью-Йорк
Подтверждение	Д'Арриго Р., Уилсон Р. и Якоби Г. 2006 В долгосрочной перспективе контекст потепления конца двадцатого века J. Geophys. Res. Атмос. 111 D03103	Данби РК и Хик ДС 2007 г. Доказательства недавней динамики границы леса на юго-западе Юкона по аэрофотоснимкам Арктики 60 411–20
Работа выполнена при поддержке проекта Министерства образования и науки Российской Федерации FWES-2024-0023. УН поддержан грантом ERC Consolidator Grant Glacial Legacy (грант №. 772852), SK получил поддержку от DFG (проект № 448651799), а UB получил финансирование от Чешского научного фонда (№ 23-08049S; Hydro8), грант ERC Advanced (№ 882727; Monostar) и грант ERC Synergy (№ 101118880; Synergy-Plague).	Деви Н.М., Кукарских В.В., Галимова А.А., Мазепа В.С. и Григорьев А.А. 2020 Проявления изменения климата в росте деревьев и продуктивности древостоев в экотоне верхней границы леса на Полярном Урале . Экосистема 7 7 Деви Н., Хагедорн Ф., Моисеев П., Бугманн Х., Шиятов С., Мазепа В. и Риглинг А. 2008 Расширение лесов и изменение форм роста сибирской лиственницы на Полярном Урале	
ORCID идентификаторы	Александр В Кирдянов https://orcid.org/0000-0002-6797-4964	Стефан Крузе https://orcid.org/0000-0003-1107-1958
Ссылки	Абаимов А.П., Бондарев А.И., Зырянова О.А. и Шитова С.А. 1997 Полярные леса Красноярского края (Новосибирск. Наука) 208 с. Анисимов О.А. 2007 Потенциальная обратная связь таяния вечной мерзлоты с глобальной климатической системой через эмиссию метана Письма об экологических исследованиях 2 045016	Бала Г., Калдейра К., Уикетт М., Филипп Т.Дж., Лобелл Д.Б., Делир К. и Мирин А. 2007 г. Совместный климат и углеродный цикл

линия леса в течение 20 века Глобальное изменение Биол.
14 1581–91

Дайал Р.Дж., Махер К.Т., Хьюитт Р.Э. и Салливан П.Ф. 2022 Достаточные условия для быстрого расширения ареала бореальных хвойных деревьев Природа 608 546–51

Дронова И. и Таддео С. 2022 Дистанционное зондирование фенологии: к комплексным показателям динамики растительного сообщества от видового до регионального масштаба Журнал экологии 110 1460–84

Dufour-Tremblay G, Lévesque E и Boudreau S 2012 Динамика на границе леса: дифференциальные реакции *Picea mariana* и *Larix laricina* на изменение климата в восточной субарктике Квебека Окружающая среда. Письмо 7 044038

Эспер Дж., Франк Д., Бюнтген У., Верстеге А., Хантемиров Р.М. и Кирдянов А.В. 2010 Тенденции и неопределенности в сибирских индикаторах потепления в 20 веке // Глобальные изменения в биологии. 16 386–98

Эспер Дж. и Швайнгрубер Ф.Х. 2004 Крупномасштабные изменения границы леса, зафиксированные в Сибири . Письмо геофизических исследований 31 L06202

Федоров А.Н., Константинов П.Ю., Васильев Н.Ф., Шестакова А.А. 2019 Влияние динамики бореальных лесов на современное состояние многолетнемерзлых пород Центральной Якутии Полит. наук 22 100483

Фомин В.В., Михайлович А.П. и Шиятов С.Г. 2020 Деревья в экотоне верхней границы леса на Полярном Урале: многовековые изменения и пространственные закономерности Mt. Res. Dev. 40 P32–40

Фрэнсис JA, Ваврус SJ и Коэн J 2017 Amplified Arctic потепление и погода в средних широтах: новые перспективы новых связей WIREs Clim. Change 8 e474

Fritts HC 1976 Tree-Rings and Climate (Academic Press) стр. 576

Fujii K, Yasue K и Matsuura Y 2022 Древесные кольца свидетельствуют о быстром развитии пьяного леса, вызванном потеплением вечной мерзлоты . Глобальные изменения в биологии 28 3920–8

Гао С и др. 2022 Более раннее начало теплового вегетационного периода усиливает рост деревьев в холодных влажных районах, но не в сухих районах. Nat. Ecol. Evol. 6 397–404

Готье С., Бернье П., Куулувайнен Т., Швиденко А.З. и Щепаченко Д.Г. 2015 Здоровье бореальных лесов и глобальные изменения Наука 349 819–22

Григорьев А.А., Деви Н.М., Кукарских В.В., Вьюхин С.О., Галимова А.А., Моисеев П.А., Фомин В.В. 2019 Структура и динамика древостоев на верхней границе леса в западной части плато Путорана . Экологический журнал 50 311–22

Гурская М.А. 2014 Температурные условия формирования морозобойных повреждений хвойных деревьев в высоких широтах Западной Сибири // Вестник биологических наук РАН 41 187–96

Гурская М.А. 2021 Формирование морозобойных повреждений у лиственницы, произрастающей в северной и южной подзонах лесотундры Сибири: сравнительный анализ Рос. ж. экол. 52 556–66

Гурская МА, Ланге Й, Кукарских ВВ, Бурас А и Вильмкин М 2021 Стационарность реакции климата на рост лишь в незначительной степени зависит от режима влажности почвы в Западной Сибири Дендрохронология 69 125873

Ханссон А., Янг В.Х., Даргуш П. и Шульмейстер Дж. 2023 Исследование взаимосвязи между миграцией границы леса и изменениями температуры и осадков в Северном полушарии и его субрегионах . Текущий отчет для доклада. 9 72–100

Хантемиров Р.М. и др. 2022 Текущее сибирское отопление беспрецедентный за последние семь тысячелетий Нац. Сообщ. 13 4968

Хантемиров Р.М., Шиятов С.Г., Горланова Л.А., Кукарских В.В., Ю. Сурков А., Хамзин И.Р., Фонти П. и Ваккер Л. 2021 8768-летняя древесно-кольцевая хронология Ямала как инструмент палеоэкологических реконструкций Русс. Дж. Экол. 52 419–27

Хеллманн Л. и др. 2016 Разнообразные тенденции роста и климат реакции в бореальных лесах Евразии Окружающая среда. Res. Lett. 11 074021

Хьюз МК, Ваганов ЕА, Шиятов С, Тучан Р и Фанкхаузер Г 1999 Летнее тепло двадцатого века на севере Якутии в 600-летнем контексте Голоцен 9 629–34

Якоби Г.С., Ловелиус Н.В., Шумилов О.И., Располов О.М., Карбаинов Дж. М. и Франк Д. К. 2000 Долгосрочные тенденции температуры и рост деревьев в районе Таймыра на севере Сибири. Quat. Res. 53 312–8

Кан Дж, Ян З, Ю Б, Ма Ц, Цзян С, Шишов ВВ, Чжоу П, Хуан Дж. Г. и Дин Х. 2023 г. Более раннее начало вегетационного периода может повлиять на радиальный рост деревьев посредством регулирования совокупной скорости роста . Сельское хозяйство. Метеорология. 342 109738

Харук В.И., Петров И.А., Им СТ., Голюков А.С., Двинская М.Л., Шушпанов А.С., Савченко А.П., Темерова В.Л. 2023 Растительность Субарктики в условиях смешанного влияния потепления и загрязнения воздуха Леса 14 615

Харук В.И., Рэнсон К.Дж., Им С.Т., Оскорбин П.А., Двинская М.Л. и Овчинников Д.В. 2006 Древовидная структура и динамика на северной окраине лиственничного леса: Анабарское плато, Сибирь, Россия Аркт. Антаркт. Альп. Рез. 45 526–37

Кирдянов А.В. и др. 2020 Экологические и концептуальные последствия загрязнения Арктики Ecol. Lett. 23 1827–37

Кирдянов А.В., Хагедорн Ф., Кнорре А.А., Федотова Е.В., Ваганов Е.А., Наурзбаев М.М., Моисеев П.А. и Риглинг А. Продвижение границы леса в 20 веке и изменения растительности вдоль высотного трансекта в горах Путорана, север Сибири Борей 41 56–67

Кирдянов А.В., Пьерматтей А., Колар Т., Рыбничек М., Крушич П.Ю., Николаев АН, Рейниг Ф и Бюнтген У 2018 Заметки об оптимальной стратегии отбора проб в дендроклиматологии Дендрохронология 52 162–6

Кирдянов А.В., Прокушкин А.С., Табакова М.А. 2013 Годичный прирост лиственницы Гмелина в контрастных локальных условиях севера Средней Сибири Дендрохронология 31 114–9

Кирдянов А.В., Заурер М., Арзак А., Кнорре А.А., Прокушкин А.С., Чуракова (Сидорова) О.В., Арозио Т., Бебчук Т., Зигвольф Р. и Бюнтген У. 2024 Таяние вечной мерзлоты может смягчить вызванный потеплением стресс от засухи у деревьев бореальных лесов Sci. Всего Окружающая Среда 912 168858

Кирдянов А., Хьюз Х., Ваганов Е., Швайнгрубер Ф. и Силкин П. 2003 Значение температуры начала лета и даты таяния снега для роста деревьев в сибирской Субарктике . 17 61–69

Кнорре А.А., Кирдянов А.В., Прокушкин А.С., Крушич П.И. и Бюнтген У. 2019 Реконструкция долгосрочного влияния лесных пожаров на динамику деятельного слоя вечной мерзлоты в Центральной Сибири на основе годичных колец . Sci. Total Environ. 652 314–9

Кнорре А.А., Кирдянов А.В., Ваганов Е.А. 2006 Климатически обусловленная межгодовая изменчивость надземной продукции в лесотундре и северной тайге Центральной Сибири Экология 147 86–95

Колмогоров А.И., Крузе С., Николаев А.Н., Кирдянов А.В. и Пестрякова Л.А. 2023 Дендроклиматические исследования *Larix sibirica* Mayr. в бассейне реки Омолуй . Субаркт. Природные ресурсы 28 584–94 на русском языке

Крузе С., Шевцова И., Хайм Б., Пестрякова Л.А., Захаров Е.С. и Герцшух У. 2023 Сохранение тундры, осложненное расширением лесов в сложном горном экотоне, как показало пространственно-явное моделирование надземной биомассы деревьев. Аркт. Антаркт. Альп. Рез. 55 2220208

Куллман Л. 2007 Мониторинг популяции линии роста деревьев *Pinus sylvestris* в шведских Скандинавских горах, 1973–2005: выводы для теории линии роста деревьев и экологии изменения климата. Журнал экологии 95 41–42

Liang M, Sugimoto A, Tei S, Takano S, Morozumi T, Shingubara R, Murase J и Maximov TC 2023 Реакция арктических растений на летний климат и наводнения: исследование роста лиственницы, связанного с углеродом и азотом, и параметров экосистемы в северо-восточной Сибири J. Geophys. Res. 128 e2022JG007135

Линдерхольм НВ 2006 Изменения вегетационного периода в прошлом веке Сельскохозяйственная метеорология 137 1–14

Ливенспергер К., Штельцер Х., Дарроузе-Нарди А., Салливан П.Ф., Валленштайн М. и Вайнтрауб М.Н. 2016 г. Более раннее таяние снега и потепление приводят к более раннему, но не обязательно более интенсивному росту растений

Растения АОВ 8 лв021

Ллойд АН, Банн АГ и Бернер Л 2011 Широтный градиент в реакции роста деревьев на потепление климата в сибирской тайге . Глобальные изменения в биологии 17 1935–45

Макдональд ГМ, Кейс РА и Сейч ДжМ 1998 538-летняя летопись динамики климата и линии леса в нижнем течении реки Лена

регион северной Сибири, Россия Аркт. Альп. Рез. [30 334–9](#)

Меко Д.М., Панюшкина ИП, Агафонов Л.И. и Эдвардс Дж.А. 2020 Влияние высоких потоков арктической реки на ширину колец пойменных деревьев Голоцен [30 789–98](#) Менцель А и др. 2006

Фенологическая реакция Европы на изменение климата соответствует модели потепления . Глобальные изменения в биологии. [12 1969–76](#)

Miesner T et al 2022b Набор данных о деревьях из лесных инвентаризаций в северо-восточной Сибири PANGAEA (<https://doi.org/10.1594/PANGAEA.943547>)

Миснер Т, Герцшу У, Пестрякова Л.А., Вечорек М, Захаров Е.С., Колмогоров А.И., Давыдова П.В. и Крузе С. 2022a Структура лесов и индивидуальные инвентаризации деревьев северо-востока Сибири вдоль климатических градиентов // Системы наук о Земле. Данные [14 5695–716](#)

Наурзабаев М.М., Ваганов Е.А., Сидорова О.В. и Schweingrube FH 2002 Летние температуры в восточной части Таймыра, выведенный из 2427-летней позднеголоценовой древесно-кольцевой хронологии и более ранней плавающей серии голоцена [12 727–36](#)

Николаев А.Н., Федоров П.П. и Десяткин А.Р. 2011 Эффект Влияние гидротермических условий многолетнемерзлых почв на радиальный прирост лиственницы и сосны в Центральной Якутии // Современные проблемы экологии. [4 140–9](#)

Ols C, Klesse S, Girardin MP, Evans MEK, DeRose RJ и Trouet V 2023 Удаление тренда из климатических данных до анализа роста климата в дендрозкологии: общепринятая передовая практика? Dendrochronologia [79 126094](#) Паульсен Дж. и Кёрнер К. 2014

Климатическая модель для прогнозирования потенциального положения границы леса по всему миру Альп. Бот. [124 1–12](#)

Piao S et al 2015 Начало листопада в северном полушарии, вызванное дневной температурой Nat. Commun. [6 6911](#) Превиди М., Смит КЛ. и Полвани Л.М. 2021 Арктическое усиление изменения климата: обзор основных механизмов . Письмо об экологических исследованиях [16 093003](#) Рантанен М, Карпечко АЮ, Липпонен А, Нордлинг К, Хиваринен О., Руостиноя К., Вихма Т. и Лааксонен А. 2022 С 1979 года Арктика нагревается почти в четыре раза быстрее, чем на планете, Соммил. Окружающая среда Земли. [3 168](#)

Рис В.Г., Хофгаард А., Будро С., Кэрнс Д.М., Харпер К., Mamet S, Mathisen I, Swirad Z и Tutubalina O 2019 Сможет ли развитие субарктических лесов идти в ногу с изменением климата? Global Change Biol. [26 3965–77](#) Ринн Ф. 2003 TSAP-Win — Анализ временных рядов и презентация Дендрохронологии и связанных с ней приложений (Фрэнк Ринн)

Ринне КТ, Заурер М, Кирдянов А.В., Брюханова М.В., Прокушкин А.С., Чуракова (Сидорова) О.В. и Зигвольф Р.Т.В. 2015a Изучение реакции углеводов хвои сибирской лиственницы на климат с использованием специфического для соединений δ 13C и концентрационного анализа. Окружающая среда клеток растений. [38 2340–52](#) Ринне КТ, Заурер М, Кирдянов

А.В., Лоадер Н, Брюханова М.В., Вернер Р. и Зигвольф Р.Т.В. 2015b Связь между соотношением изотопов углерода в игольчатом сахаре и годовичными кольцами лиственницы сибирской. Физиология деревьев. [35 1192–205](#) Шефер К., Чжан Т., Брюхвилер Л. и Барретт А.П. 2011

Объем и время высвобождения углерода из вечной мерзлоты в ответ на потепление климата Tellus B [6 165–80](#) Schuur EAG et al 2015 Изменение климата и обратная связь по углероду вечной мерзлоты Nature [520 171–9](#) Швайнгрубер Ф.Х. 1996 Годичные кольца деревьев и окружающая среда: Дендрозкология (Haupt) стр. 609

Serreze MC и Barry RG 2011 Процессы и последствия арктического усиления: исследовательский синтез Глобальные изменения планеты [77 85–96](#)

Шестакова Т.А., Гутьеррес Э., Кирдянов А.В., Камареро Дж.Дж., Дженова М., Кнорре А.А., Линарес Х.К., де Диос В.Р., Санчес-Сальгеро Р. и Вольтас Дж. 2016. Леса синхронизируют свой рост в контрастных регионах Евразии в ответ на потепление климата . Натл Акад. наук. США [113 662–7](#)

Шишов В.В., Арзак А., Попкова МИ., Ян Б., Хе М. и Ваганов Е.А. 2023 Экспериментальный и теоретический анализ роста годовичных колец деревьев в холодном климате Бореальные леса перед лицом изменения климата (Достижения в исследованиях глобальных изменений, том 74, под ред. М.М. Жироны, Х. Морена, С. Готье и И. Бержерона (Springer)

Шишов В.В., Тычков И.И., Попкова М.И., Ильин В.А., Брюханова М.В., Кирдянов А.В. 2016 V5-осциллограф: новый инструмент для параметризации радиального прироста деревьев с учетом климатических условий Дендрохронология [39 42–50](#) Шиятов С.Г. 1993 Динамика верхней границы леса за последние 1100 лет в горах Полярного Урала. Колебания альпийской и полярной границ леса в голоцене под ред. Б. Френцеля, Б. Эронена и М. Глазера (Gustav Fischer Verlag) стр. 195–203

Шур Ю.Л. и Йоргенсон М.Т. 2007 Закономерности формирования и деградации вечной мерзлоты в связи с климатом и экосистемами Пермаф. Перигляк. Процесс. [18 7e19](#) Сент-Джордж С 2014

Обзор записей ширины годовичных колец деревьев в Северном полушарии Quat. Sci. Rev. [95 132–50](#)

Стуензи С.М., Бойке Дж., Гедеке А., Герцшу У., Крузе С., Пестрякова Л.А., Вестерманн С. и Лангер М. 2021 Чувствительность вечной мерзлоты, защищенной экосистемой, к изменению структуры бореальных лесов . Письма об экологических исследованиях. [16 084045](#)

Тей С и др. 2019a Экстремальное наводнение, вызванное сильным снегопадом в бассейне реки Индигирка на северо-востоке Сибири Гидрол. Процесс. [34 522–37](#)

Тей С., Нагаи С. и Сугимото А. 2019b Влияние типа набора климатических данных на анализ годовичных колец деревьев: пример сибирских лесов Polar Sci. [21 136–45](#)

Тей С и Сугимото А 2020 Чрезмерно позитивный отклик Первичная продукция земельной сети, смоделированная с помощью модели, в ответ на изменения климата в циркумбореальных лесах Plant-Environ. Int. [1 102–21](#)

Турецкий М.Р. и др. 2019 Разрушение вечной мерзлоты ускоряет выбросы углерода релиз Природа [569 32–34](#)

Ваганов Е.А., Хьюз М.К., Кирдянов А.В., Швайнгрубер Ф.Х. и Силкин П.П. 1999 Влияние сроков выпадения и таяния снега на рост деревьев в субарктической Евразии Природа [400 149–51](#)

Ваганов Е.А., Хьюз М.К. и Шашкин А.В. 2006 Рост. Динамика годовичных колец хвойных деревьев: образы прошлого и будущего Окружающая среда Экологические исследования том 183 (Springer Science & Деловые СМИ)

Ваганов Е.А., Шиятов С.Г. и Мазепа В.С. 1996 Дендроклиматические исследования в Урало-Сибирской субарктической зоне (Наука) стр. 246 на русском языке Вичорек М, Крузе С, Эпп ЛС, Колмогоров А, Николаев АН, Генрих И, Ельч Ф, Пестрякова Л.А., Зибульский Р и Герцшу Ю 2017 Различная реакция лиственничных насаждений на севере Сибири на повышение температуры: полевые исследования и моделирование Экология [98 2343–55](#) Ин Г., Нью Ф., Линь З., Ло Дж. и Лю М. 2017 Влияние местных факторов и климата на условия и распространение вечной мерзлоты в бассейне Бейлухэ, Цинхай-Тибетское нагорье, Китай . Наука и окружающая среда. [581 472–85](#)