



Списки содержания доступны на [сайте ScienceDirect](#)

Наука об окружающей среде

Домашняя страница журнала: [www.elsevier.com/locate/scitotenv](http://www.elsevier.com/locate/scitotenv)



Таяние вечной мерзлоты может смягчить вызванный потеплением стресс от засухи у деревьев бореальных лесов

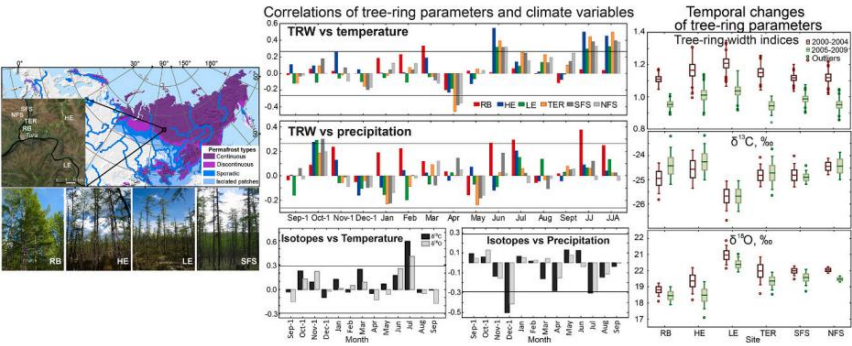
Александр В. Кирдянов<sup>а,б,в,\*</sup> Альберто Арзак<sup>а,б,в,\*</sup> Маттиас Заурер<sup>г</sup> Анатолий С. Урушкин<sup>б,с</sup> Анастасия А. Кнорре<sup>с,е</sup> ,  
Чуракова Ольга Васильевна (Сидорова)<sup>б,г</sup> , Тито Арозио<sup>а</sup> , Татьяна Бибчук<sup>а</sup> ,  
Рольф Зигвольф<sup>г</sup> Ульф Бюнтген<sup>а,д,ф,г</sup>

<sup>а</sup> Географический факультет Кембриджского университета, CB2 3EN, Великобритания  
<sup>б</sup> Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр СО РАН», 660036 Красноярск, Академгородок, Российская Федерация  
<sup>с</sup> Сибирский федеральный университет, 660041 Красноярск, Свободный, 79, Российская Федерация  
<sup>г</sup> Швейцарский федеральный институт исследований леса, снега и ландшафта WSL, CH-8903 Бирмендорф, Швейцария  
<sup>е</sup> Национальный парк «Красноярские столбы», Красноярск 660006, Российская Федерация  
<sup>ф</sup> Географический факультет, Университет Масарика, 61137 Брно, Чешская Республика и Центр исследований глобальных изменений, 61300 Брно, Чешская Республика

ОСНОВНЫЕ МОМЕНТЫ

- Значительное потепление на севере Центральной Сибири с 1960 года.
- Атмосферные и почвенные условия имеют решающее значение для роста деревьев на вечной мерзлоте.
- Температура в начале лета ограничивает рост деревьев в большинстве сред на вечной мерзлоте.
- Осадки важны для роста деревьев на хорошо дренируемых вечной мерзлоте.
- Талый снег и замерзшая почва являются источником воды для деревьев в сухое лето.

ГРАФИЧЕСКИЙ АБСТРАКТ



ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

Редактор: Елена Паолетти

Ключевые слова:  
Активный слой почвы  
Бореальный лес  
Дендрохронология  
Глобальное потепление  
Сибирь  
Стабильные изотопы  
Рост деревьев

АБСТРАКТНЫЙ

Многолетняя мерзлота, также известная как вечная мерзлота, важна для функционирования и продуктивности большей части бореальных лесов, крупнейшего в мире наземного биома. Лучшее понимание сложных взаимосвязей растительности и вечной мерзлоты необходимо для прогнозирования изменений в динамике углеродного, питательного и водного циклов от локального до крупномасштабного в условиях будущего глобального потепления. Здесь мы анализируем ширину годичных колец и измерения стабильных изотопов (C и O) годичных колец лиственницы Гмелина (*Larix gmelinii* (Rupr.) Rupr.) из шести участков вечной мерзлоты в северной тайге Центральной Сибири. Наш многопараметрический подход показывает, что изменения в росте деревьев в основном контролировались температурой воздуха и верхнего слоя почвы, а также влажностью активной почвы и верхних слоев вечной мерзлоты. Наблюдаемые закономерности варьируются от сильных ограничений роста ранними летними температурами на возвышенностях до значительного контроля роста осадками на более теплых и хорошо дренированных участках на нижних высотах. Усиленный радиальный рост деревьев наблюдается в основном на участках с быстро оттаивающими верхними минеральными слоями почвы, а сра

\* Автор-корреспондент: Географический факультет Кембриджского университета, CB2 3EN, Великобритания.  
Адрес электронной почты: [ak2118@cam.ac.uk](mailto:ak2118@cam.ac.uk) (А.В. Кирдянов).

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168858> Получено 17 сентября 2023 г.; Получено в измененном виде 21 ноября 2023 г.; Принято 23 ноября 2023 г. Доступно онлайн 27 ноября 2023 г.

изотопы за пятилетние периоды с различным количеством летних осадков показывают, что деревья могут предотвращать стресс от засухи, получая доступ к воде из талого снега и сезонно замерзшей почвы. Определение активных слоев почвы и верхних слоев вечной мерзлоты как основных водных ресурсов для роста boreальных деревьев в сухое лето демонстрирует сложность реакций экосистемы на климатические изменения.

## 1. Введение

Зона boreальных лесов переживает беспрецедентные темпы недавнего потепления (Gauthier et al., 2015), рекордные температуры в 38 °C были зарегистрированы летом 2020 года в Верхоянске, к северу от Полярного круга в Восточной Сибири (Ciavarella et al., 2021; Всемирная метеорологическая организация, 2021). Эти тенденции и экстремальные явления особенно тревожны, поскольку boreальные экосистемы чрезвычайно уязвимы к повышению температуры из-за положительных обратных связей, включая расширение растительности и выбросы парниковых газов в результате таяния вечной мерзлоты (Anisimov, 2007; Koven et al., 2011; Schaefer et al., 2011; Schuur et al., 2015; Turetsky et al., 2019). Масштаб таких угроз становится еще более очевидным, если учесть, что до 80 % зоны boreальных лесов покрыто вечной мерзлотой (Helbig et al., 2016). Текущее потепление и прогнозируемая деградация вечной мерзлоты будут иметь значительные последствия для широкого спектра тесно взаимосвязанных природных и общественных систем в циркумполярных высоких северных широтах (Anisimov and Reneva, 2006; Biskaborn et al., 2019; Teufel and Sushama, 2019; Li et al., 2023a).

Термин «вечная мерзлота» относится к вечномерзлым грунтам с самым верхним слоем сезонно оттаивающего пласта, так называемым деятельным слоем (AL) (см. определение Подкомитета по мерзлоте, 1988). Хотя глубина вечной мерзлоты может достигать сотен метров, а среднегодовая температура почвы может быть всего лишь -13 °C, толщина AL обычно варьируется от нескольких сантиметров до нескольких метров в зависимости от географии и топографии, а также микрорельефа (например, насыпь или ложбина), растительного покрова, пожарной активности, текстуры почвы и многих других факторов (Анисимов и Ренева, 2006). В свою очередь, рост деревьев может зависеть от толщины и термогидрологического режима AL, который определяет глубину корней и обеспечивает водные и питательные ресурсы (Sugimoto et al., 2002; Pro-kushkin et al., 2018).

Рост деревьев и продуктивность леса в вечной мерзлоте обычно ограничиваются температурой (Jacoby and D'Arrigo, 1995; Vaganov et al., 1996, 1999; Briffa et al., 1998; Davi et al., 2003; Knorre et al., 2006). Эспер и др., 2010; Бюнтген и др., 2020, 2021a; Фонти и др., 2021; Хантемиров и др., 2021, 2022; Однако на рост деревьев могут влиять и другие факторы, такие как антропогенное загрязнение и арктическое затемнение (Кирдянов и др., 2014, 2020a; Стайн и Хайберс, 2014; Бюнтген и др., 2021b; Харук и др., 2023b), лес пожары и последующие изменения толщины AL (Goetz et al., 2007; Knorre et al., 2019, 2022; Kirdeyanov et al., 2020b), топографии (Li et al., 2021), а также наводнения (Tei et al., 2020). Таяние вечной мерзлоты из-за глобального потепления (Jorgenson and Osterkamp, 2005; Baltzer et al., 2014) является одним из основных природных нарушений (Brandt et al., 2013). Сложность взаимодействия между ростом boreальных лесов и изменениями вечной мерзлоты может быть решена путем с использованием комбинации стабильных изотопов годовичных колец и других параметров годовичных колец (Сидорова и др., 2012; Брюханова и др., 2015). На сегодняшний день ряд исследований были сосредоточены на дендроклиматических и физиологических аспектах роста деревьев на вечной мерзлоте (Барбер и др., 2000; Кирдянов и др., 2008; Портер и др., 2009; Сидорова и др., 2010; Брюханова и др. и др., 2015; Чуракова и др., 2022, Чуракова (Сидорова) и др., 2023; Левек и др., 2023). Кроме того, модельные эксперименты и полевые наблюдения изотопного сигнала в осадках и почвенной воде исследовали возможное влияние вечной мерзлоты как источника воды для деревьев (Sugimoto et al., 2002; Sugimoto, 2019; Saurer et al., 2016; Чуракова-Сидорова, и др., 2020a; Fan et al., 2021). Однако лишь немногие исследования рассматривали контрастные условия среды обитания для лучшего понимания взаимодействия вечной мерзлоты, почвы, деревьев и атмосферы, особенно в условиях быстрого глобального потепления (Shi et al., 2024).

До сих пор предполагалось, что таяние вечной мерзлоты может вызвать существенное высыхание AL (Lawrence et al., 2015; Andresen et al., 2020) с последующим воздействием на функционирование и продуктивность boreального леса. Однако следует отметить, что сложное взаимодействие растительности и вечной мерзлоты до сих пор не очень хорошо изучено (Heijmans et al., 2022; Li et al., 2023b; Ogden et al., 2023). Здесь мы предполагаем, что в дополнение к атмосферным условиям изменения сезонного таяния активного слоя влияют на рост boreальных деревьев на вечной мерзлоте.

Для проверки вышеизложенной гипотезы мы анализируем ширину годовичных колец и стабильные изотопы углерода и кислорода листовенницы Гмелина (*Larix gmelinii* (Rupr.) Rupr.) из шести участков вечной мерзлоты в boreальных лесах Центральной Сибири, которые отражают контрастные условия среды обитания. Мы описываем темпы роста деревьев и климатические реакции как ширины годовичных колец, так и измерений стабильных изотопов, а также обсуждаем наблюдаемые закономерности в отношении связи растительности и вечной мерзлоты и термогидроклимата почвы.

## 2. Материалы и методы

Образцы древесины были собраны в провинции Тура на севере Центральной Сибири (рис. 1A), где постоянная глубина вечной мерзлоты колеблется от 200 до 500 м (Brown et al., 1997; Кривоногова и Кондратьева, 1989). Для региона характерен в целом неглубокий AL в несколько десятков сантиметров, который может быть толще после лесных пожаров (Кирдянов и др., 2020b). Климат в Туре резко континентальный, со среднегодовой температурой 8,5 °C (WMO 24507 «TURA»; 1960–2021). Самые теплые и самые холодные месяцы — июль и январь (17 °C и 35 °C) соответственно. Годовое количество осадков составляет около 420 мм (mete.ru), из которых 42 % выпадает в летние месяцы с июня по август. Месячные и сезонные средние температуры демонстрируют статистически значимый рост ( $p < 0,00001$ ) с потеплением на 0,45, 0,36 и 0,48 °C/десятилетие в июне-июле, летом (июнь-август) и ежегодно, соответственно (рис. 2A). Однако годовые и сезонные суммы осадков с 1960 года не показывают каких-либо существенных изменений (рис. 2B). В этом исследовании мы уделяем особое внимание двум пятилетним периодам с 2000 по 2004 и с 2005 по 2009 годы, в течение которых наблюдались существенные различия в суммах летних осадков (рис. 2D). В 2000–2004 годах было зафиксировано на 38 % больше осадков в июне-июле и на 25 % больше летом, чем в среднем в 1960–2015 годах. Напротив, в среднем за 2005–2009 гг. в июне-июле и летом было зафиксировано на 21 % и 13 % меньше осадков соответственно. Июнь-июль и лето в 2000–2004 гг. были на 0,81 и 0,71 °C теплее, чем в 1960–2021 гг. и на 0,23 и 0,39 °C теплее по сравнению с 2005–2009 гг. (рис. 2C). Важно, что средние значения температуры июня в течение первого пятилетнего периода с 2000 по 2004 гг. были на 1,14 °C выше, чем в 2005–2009 гг. Ежемесячные значения стандартизированного индекса осадков и эвапотранспирации (SPEI) (Висенте-Сеппано и др., 2010) были загружены из KNMI Climate Explorer (<https://climexp.knmi.nl/start.cgi>) для оценки засушливых условий в период с 1960 по 2018 гг. н.э.

Доминирующим видом деревьев в северо-центральной Сибири является *Larix gmelinii* (Rupr.) Rupr. (Абаимов и др., 1997), и его короткий вегетационный период, как правило, ограничен ~70–90 днями с конца мая до начала сентября (Bryukhanova et al., 2013; Rinne et al., 2015a, 2015b). В 2005–2013 годах мы выбрали шесть участков отбора проб, представляющих различные условия произрастания листовенницы Гмелина с точки зрения местоположения, рельефа, органического слоя почвы и толщины AL в районе Туры (около 64.27 °N и 100.22 °E) (таблица 1, рис. 1). Один участок (RB) расположен на берегу реки Кочечум на теплой и хорошо дренированной аллювиальной почве с самым глубоким AL в конце вегетационного периода и высокой скоростью оттаивания почвы весной (Saurer et al., 2016). Другие насаждения (HE, LE, TER, SFS и NSF) были



развивались на делювиальных суглинистых почвах и, как правило, характеризуются более мелкой AL. Хотя глубина AL на участке LE сопоставима с RB, оттаивание верхнего слоя почвы в начале вегетационного сезона на этом участке, как правило, происходило медленнее (таблица 1). Для обновления данных по годичным кольцам на исследуемых участках в период с 2016 по 2021 год были собраны дополнительные керны деревьев. Все образцы были высушены на воздухе и установлены на деревянных опорах. Их поверхность была срезана и контрастирована мелом для улучшения видимости границ годичных колец. Ширина годичного кольца (TRW) измерялась на измерительной системе LINTAB (RINNTech eK, Гейдельберг, Германия), и полученные индивидуальные серии были перекрестно датированы с использованием TSAP-win (Rinn, 2003). Перекрестное датирование было статистически проверено с помощью COFECHA (версия 6.02P; <http://www.ldeo.columbia.edu/tree-ring-laboratory/resources/software/>). В отличие от Кирдянова и др. (2018), мы использовали данные из одного керна на дерево, поскольку у нас был доступ к ранее разработанным справочным хронологиям в регионе (Панюшкина и Арбатская, 1999; Сидорова и др., 2009; Шишов и др., 2016), которые использовались для окончательной проверки. Отдельные серии TRW были стандартизированы с помощью кубических сглаживающих сплайнов с 50%-ным обрезанием частотной характеристики на 2/3 длины индивидуальной серии, и двухвесовые надежные средние остаточных версий стандартизированных серий измерений TRW использовались для получения безразмерных индексных хронологий. Остаточная версия хронологий была выбрана для дальнейшего анализа, чтобы исключить влияние биологической памяти в данных о ширине годичных колец деревьев. Стандартная дендрохронологическая статистика, такая как

Коэффициент чувствительности, средняя межсерийная корреляция ( $R_{bar}$ ) и выраженный популяционный сигнал (EPS) рассчитывались с использованием последней версии программного обеспечения ARSTAN (<https://www.geog.cam.ac.uk/research/projects/dendrosoftware/>, доступ 16.09.2023).

Стабильные изотопные соотношения углерода и кислорода измерялись для двух пятилетних блоков в пяти деревьях на участке. После перекрестного датирования древесина отдельных деревьев была разделена на периоды 2000–2004 и 2005–2009 годов, а древесный материал был измельчен для каждого дерева и периода отдельно. Дальнейшие процедуры извлечения целлюлозы, подготовки образцов и измерения изотопного состава следовали этапам, описанным в Saurer et al. (1997). Изотопные значения в целлюлозе выражены в дельта-обозначении ( $\delta$ ) относительно международного эталона V-PDB для углерода и V-SMOW для кислорода с точностью 0,1 ‰ для  $\delta^{13}C$  и 0,2 ‰ для  $\delta^{18}O$ . Данные по сырому изотопу углерода были скорректированы с учетом уменьшающегося значения  $\delta^{13}C$  атмосферного  $CO_2$  из-за сжигания ископаемого топлива (эффект Юсса, Килинг, 1979) (Belmecheri and Lavergne, 2020). Мы также использовали ежегодно разрешенные изотопные данные по лиственницам (Kirdyanov et al., 2020b), которые пережили лесной пожар 1896 года на нашем участке LE. Для интерпретации результатов значений изотопов кислорода в древесной целлюлозе мы использовали наши ранее полученные данные о среднем месячном значении  $\delta^{18}O$  в дождевой и снеговой воде на участках RB и HE (Saurer et al., 2016). Мы также использовали данные об изотопах кислорода для воды в мерзлой почве, которая может быть сезонномерзлым слоем в пределах AL или верхним слоем вечной мерзлоты

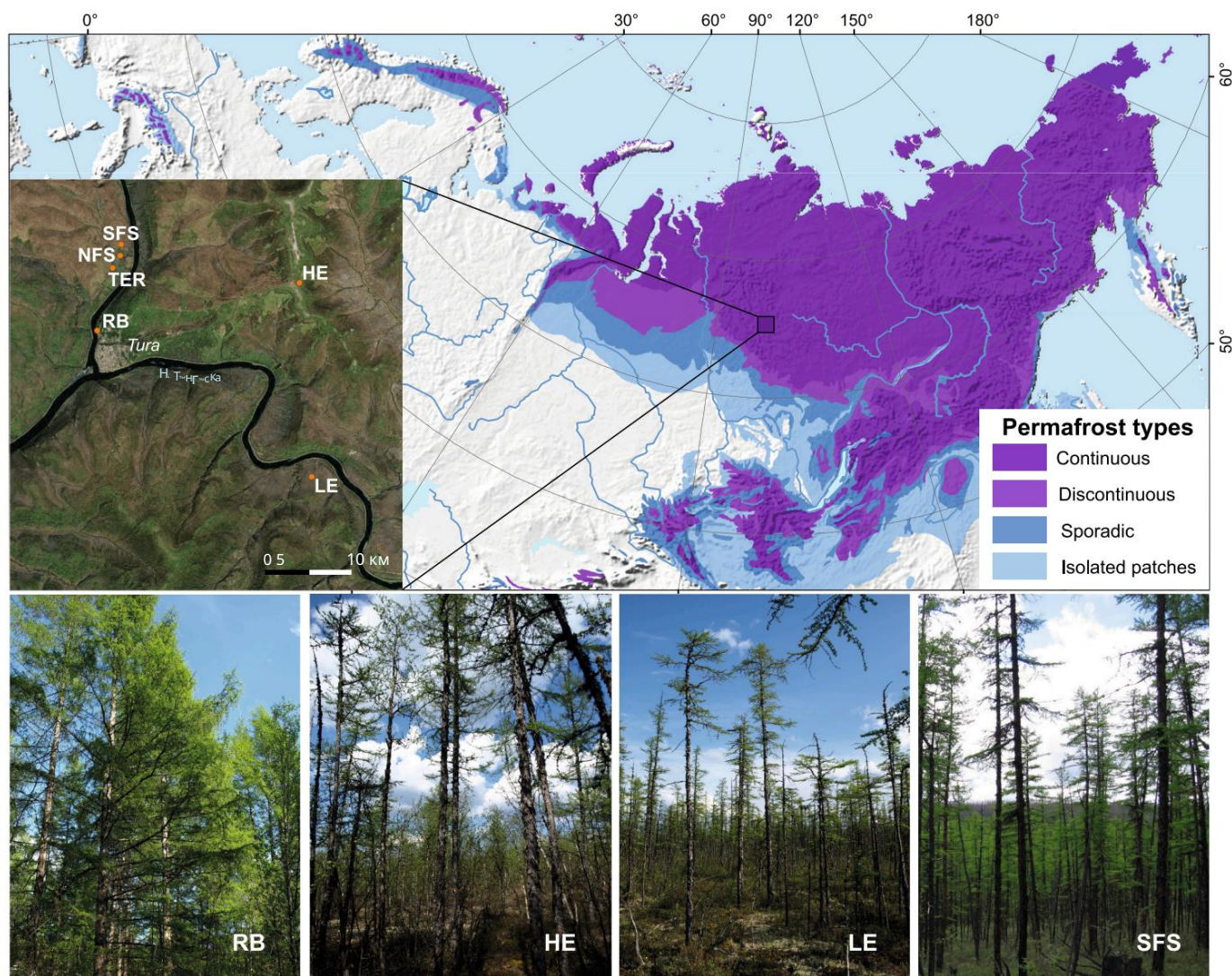


Рис. 1. Распространение вечной мерзлоты в северной Евразии (А) с местоположением участка в пределах исследуемого региона (вставка). Примеры участков исследования: RB на берегу реки, HE на высокой высоте и LE на низкой высоте и SFS на южном склоне, представляющем разнообразие насаждений и условий роста деревьев (нижняя панель).

(Заурер и др., 2016).

Для определения наиболее важных климатических факторов, контролирующих радиальный рост деревьев и изотопный состав, хронологии TRW,  $\delta^{13}C$  и  $\delta^{18}O$  были сопоставлены с выведенными из тренда (Ols et al., 2023) средними ежемесячными температурами и суммами осадков по ближайшей метеорологической станции в Туре с сентября предыдущего года по сентябрь текущего года. Для оценки влияния средних сезонных климатических показателей использовались температуры и осадки в июне–июле (JJ) и летом (JJA), а также общее количество осадков с ноября предыдущего года по апрель текущего года (w). Чтобы исключить возможное влияние предыдущих лесных пожаров на TRW (Ваганов и Кирдянов, 2010; Кнорре и др., 2019), все анализы проводились для периода после 1960 года, что составляет более 60 лет после последнего лесного пожара, наблюдавшегося на всех шести участках исследования (Кирдянов и др., 20206). В дополнение к новым полученным измерениям мы повторно использовали ранее опубликованные данные о сезонной толщине AL, температуре почвы и динамике влажности (Кирдянов и др., 2013; Брюханова и др., 2015; Заурер и др., 2016; Кнорре и др., 2019). Для оценки временных изменений параметров годичных колец деревьев и их зависимости от климатических переменных использовался однофакторный дисперсионный анализ (ANOVA) для данных TRW и изотопов, полученных для пятилетних блоков.

3. Результаты

Глубина выборки локальных хронологий TRW варьировалась от 15 до 30 деревьев (таблица 2). Самая короткая хронология — RB с 75 годами, но все остальные хронологии имеют продолжительность не менее 113 лет, а хронология TER достигает даже 408 лет. Средняя длина сегмента (MSL) колеблется от 54 (RB) до 275 (TER) лет, а средняя TRW в целом уменьшается с увеличением длины хронологии и MSL, от 2,19 ( $\pm 0,34$ ) мм для RB до 0,27 ( $\pm 0,07$ ) мм для TER. Самые высокие темпы радиального роста ствола, которые мы считаем надежным суррогатом продуктивности отдельных деревьев, обнаружены в RB (рис. 1, нижняя панель). Средняя TRW в течение первых 50 лет в RB в три-пять раз больше, чем на других участках. Более высокий рост деревьев в ювенильной фазе наблюдается на участке SFS, обращенном на юг, по сравнению с соседними участками TER и NFS. Индекс RB

Таблица

1. Участки годичных колец деревьев (среднее значение ALT = толщина активного слоя, измеренная в конце вегетационного периода, последняя декада августа, SD = стандартное отклонение).

Сайт	Высота, м над уровнем моря	Имать в виду		Середина июня ALT $\pm$ SD, см	Комментарий
		Органический слой, см	ALT $\pm$ SD, см		
РБ 145	210	8 $\pm$ 2	70 $\pm$ 13	31 $\pm$ 13	Берег реки
HE 570		15 $\pm$ 3	55 $\pm$ 9	11 $\pm$ 5	Большая высота
ЛЕ		16 $\pm$ 3	68 $\pm$ 10	5 $\pm$ 2	Пологий склон, обращенный на север
TER 230	165	18 $\pm$ 11	49 $\pm$ 7	17 $\pm$ 4	Третья терраса через реку
СФС		15 $\pm$ 2	55 $\pm$ 13	23 $\pm$ 9	Значительный микрорельеф
НФС 165		21 $\pm$ 7	29 $\pm$ 13	3 $\pm$ 2	Склон, обращенный на юг
					Склон, обращенный на север

Хронология является единственной, которая характеризуется низкой чувствительностью (коэффициент чувствительности < 0,2). Однако высокая средняя межсерийная корреляция (Rbar) и выраженный популяционный сигнал (EPS > 0,9 за период с 1960 г.) указывают на сильный общий сигнал в индивидуальных сериях TRW с каждого участка и подтверждают, что глубина выборки достаточна для дендроклиматического анализа на всех участках исследования.

Анализ реакции роста на климат в локальных хронологиях TRW выявляет статистически значимые положительные коэффициенты корреляции (P < 0,05) со средними температурами июня и летних сезонов (июнь–июль и июнь–август) на всех участках, кроме RB (рис. 3А). Самая сильная связь была обнаружена для HE, который расположен на большой высоте, и температурой июня и июня–июля (r = 0,54 и 0,50, P < 0,001 соответственно).

Радиальный рост на трех близко расположенных участках TER, SFS и NFS отрицательно зависит от температуры в апреле (r варьируется от 0,46 до 0,36, P < 0,01), а хронология RB положительно коррелирует с температурой марта (r = 0,26, P < 0,05). Корреляции с осадками

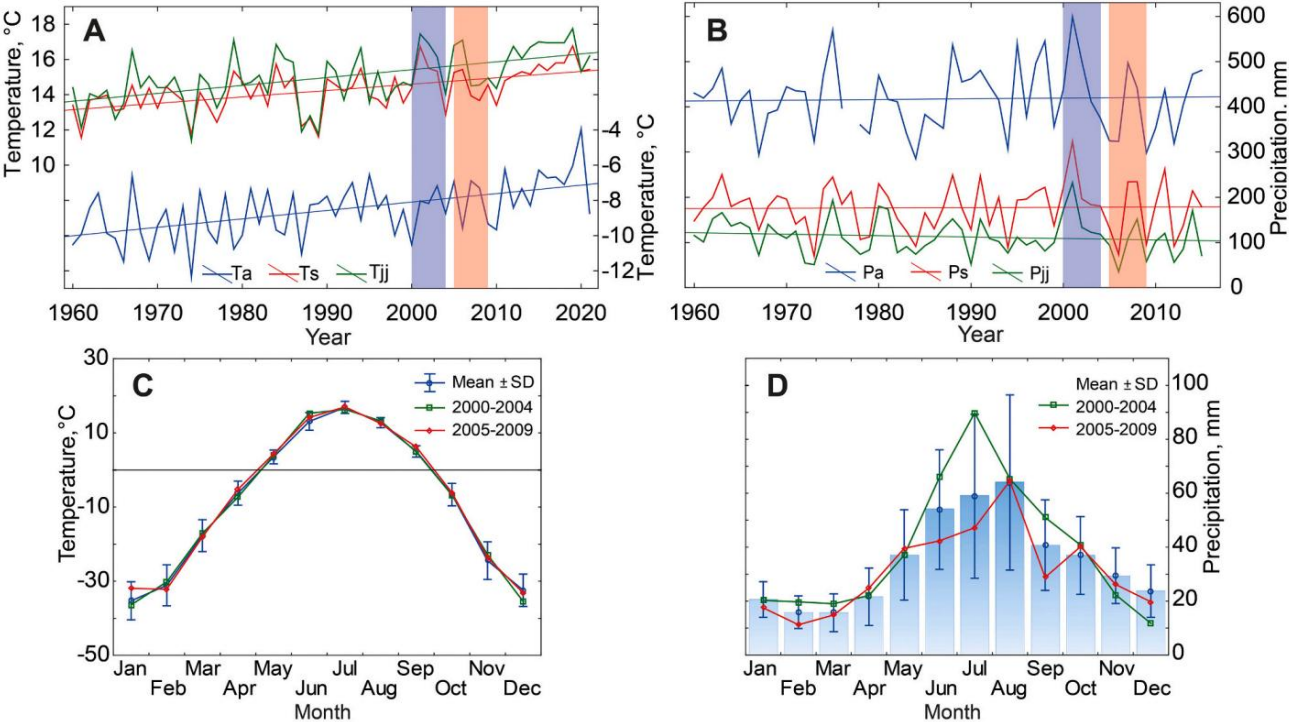


Рис. 2. Сезонные средние температуры воздуха: годовая (Ta), летняя (Ts) и июнь–июль (Tjj) (А) и сезонные суммы осадков: годовая (Pa), летняя (Ps) и июнь–июль (Pjj) (В) для метеостанции Тура. Области синего и оранжевого цветов обозначают смежные пятилетки 2000–2004 и 2005–2009, характеризующиеся разным количеством осадков летом. Среднемесячная температура (С) и месячные суммы осадков (D) для двух исследуемых периодов в сравнении со средними с 1960 года.



Таблица

2. Характеристики хронологии (MSL = средняя длина сегмента, TRW = ширина годичного кольца, Rbar = межсерийная корреляция).

Сайт	N серии	Период, лет	МСЛ	Средний TRW, мм	TRW, 50 лет, мм	Средняя чувствительность	Средний Rbar
РБ	17	1946–2020	54	2,19 ± 0,34	2,24 ± 0,39	0,184	0,479
ОН	15	1833–2020	114	0,49 ± 0,12	0,69 ± 0,23	0,327	0,522
ЛЕ	22	1908–2020	99	0,43 ± 0,07	0,70 ± 0,17	0,228	0,421
ТЕР	19	1608–2015	275	0,27 ± 0,07	0,43 ± 0,25	0,241	0,403
СФС	30	1817–2015	159	0,39 ± 0,09	0,65 ± 0,26	0,241	0,466
НФС	23	1728–2015	210	0,32 ± 0,08	0,47 ± 0,21	0,284	0,423

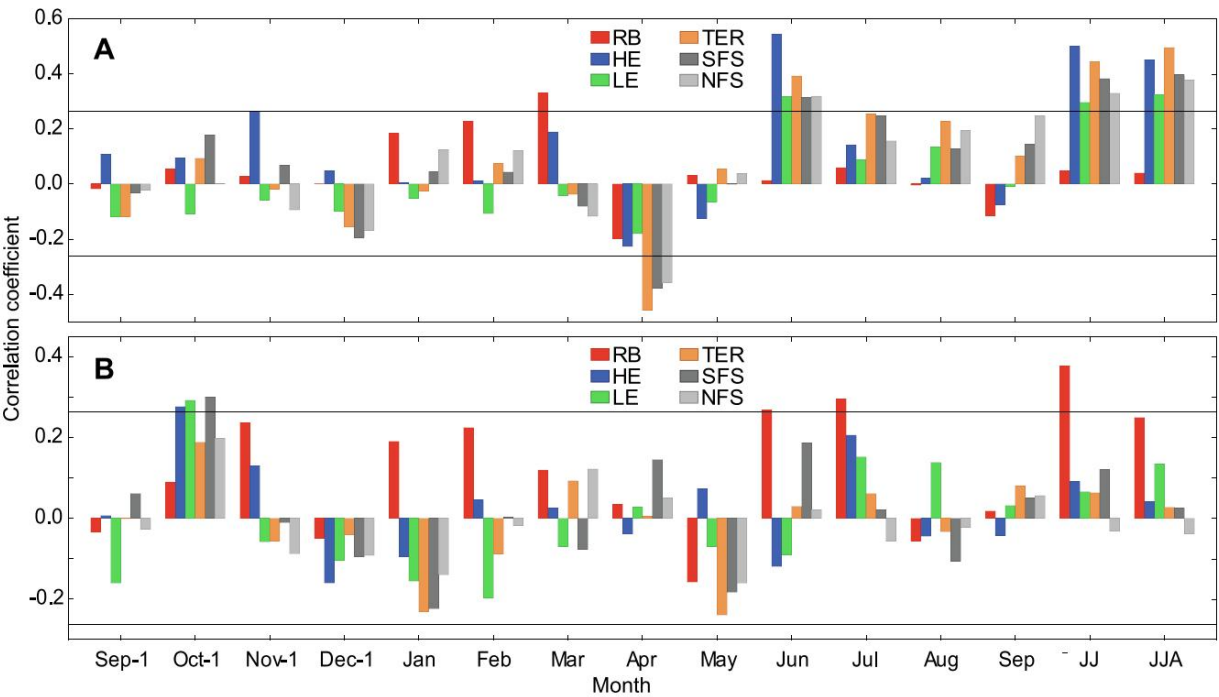


Рис. 3. Коэффициенты корреляции индексированных хронологий ширины годичных колец и среднемесячных температур июня–июля (JJ) и лета (JJA) (A) и суммарных месячных и сезонных осадков (B) с сентября по сентябрь предыдущего года формирования колец, рассчитанные за период с 1960 года. Серые линии обозначают уровень значимости  $P < 0,05$ .

в целом слабее (рис. 3B). Радиальный рост деревьев в РБ, единственном месте, где нет зависимости от летних температур, также является единственным, который значимо коррелирует с летними осадками ( $r = 0,27, 0,30, 0,38, P < 0,05$  для июня, июля и июня–июля соответственно). Три другие хронологии HE, LE и SFS демонстрируют положительную реакцию на повышенное количество осадков в октябре предыдущего года ( $r$  составляет от 0,27 до 0,30,  $P < 0,05$ ).

Корреляционный анализ между изотопными хронологиями, доступными в

регион для участка LE и климатические данные демонстрируют значительную положительную связь как  $\delta^{13}C$ , так и  $\delta^{18}O$  с июльской, июньско-июльской и летней температурой ( $r$  составляет до 0,56 для  $\delta^{13}C$  и июльской температуры) (рис. 4A). По сравнению с осадками, как изотопные соотношения углерода, так и кислорода отрицательно зависят от декабря предыдущего года ( $r = 0,50, 0,41, P < 0,005$  для  $\delta^{13}C$  и  $\delta^{18}O$  соответственно) и суммами зимних осадков ( $r = 0,44, 0,30, P < 0,05$ ) (рис. 4B). Кроме того,  $\delta^{18}O$  значительно отрицательно коррелирует с осадками в июле ( $r = 0,31, P < 0,05$ ).

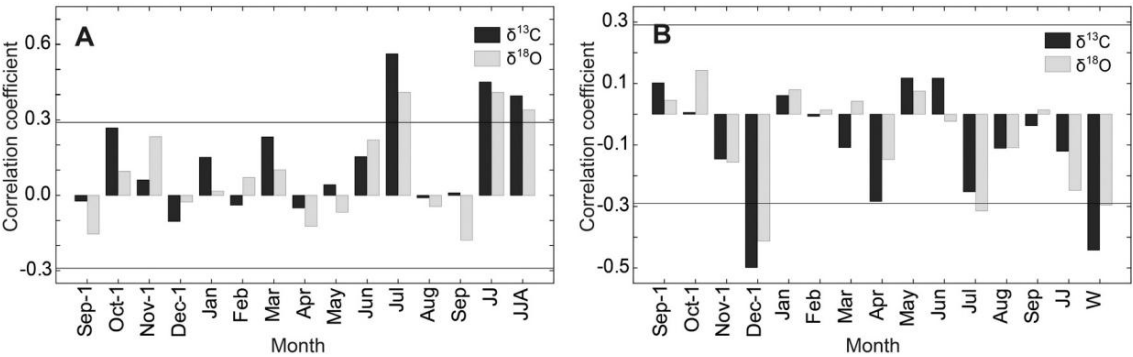


Рис. 4. Коэффициенты корреляции хронологий  $\delta^{13}C$  и  $\delta^{18}O$  с участка LE со среднемесячными температурами июня–июля (JJ) и лета (JJA) (A) и суммами месячных осадков июня–июля (JJ) и ноября предыдущего года по апрель текущего года (W) с сентября по сентябрь предыдущего года формирования колец, рассчитанными за период с 1960 года. Серые линии обозначают уровень значимости  $P < 0,05$ .

Для дальнейшего изучения влияния доступности воды на рост деревьев мы сравнили индексы TRW и изотопные соотношения в целлюлозе годовичных колец деревьев за два пятилетних периода с 2000 по 2004 год и с 2005 по 2009 год (рис. 5). Деревья, как правило, производили более широкие кольца в период 2000–2004 годов, который характеризуется более теплыми условиями в июне и более высоким количеством летних осадков по сравнению с 2005–2009 годами (рис. 5А). ANOVA указывает на статистически значимую ( $P < 0,01$ ) разницу между пятилетними средними значениями индексов TRW на всех участках. Значения  $\delta^{13}\text{C}$  не показывают никаких статистически значимых изменений между двумя периодами (рис. 5В). Однако на двух участках, RB и HE, целлюлоза несколько обогащается изотопно более тяжелым углеродом во второй пятилетке (рис. 5В). Для значений  $\delta^{18}\text{O}$  в целом наблюдается устойчивая тенденция к более легкому изотопному составу в период 2005–2009 гг. при меньшем количестве летних осадков по сравнению с более ранним периодом (рис. 5С), хотя изменения статистически значимы ( $P < 0,05$ ) только на участке NFS.

Для периода с меньшим количеством летних осадков (2005–2009 гг.) мы обнаружили более низкие значения  $\delta^{18}\text{O}$ , чем для влажного периода с большим количеством осадков (2000–2004 гг., рис. 5С), что предполагает положительную корреляцию между значениями  $\delta^{18}\text{O}$  целлюлозы годовичных колец и количеством осадков. Из-за этого несколько неожиданного открытия, контрастирующего с отрицательной зависимостью  $\delta^{18}\text{O}$  от количества осадков в июле (рис. 4В), эта связь нуждалась в более тщательном рассмотрении (рис. 6). Отношения стабильных изотопов кислорода показывают довольно небольшую, но отчетливую разницу (ANOVA,  $P < 0,05$ ) между значениями  $\delta^{18}\text{O}$  для низких ( $< 40$  мм,  $\delta^{18}\text{O} = 23,7 \pm 0,2$  ‰) и высоких ( $> 100$  мм,  $\delta^{18}\text{O} = 23,2 \pm 0,4$ ) месячных сумм осадков. Эта тенденция подтверждает отрицательную корреляцию между хронологией годовичных колец и этой климатической переменной. Однако значения  $\delta^{18}\text{O}$ , соответствующие осадкам в июле от 40 до 100 мм, характеризуются широким диапазоном значений от 21,2 до 24,7 ‰. Мы выделили две группы значений  $\delta^{18}\text{O}$

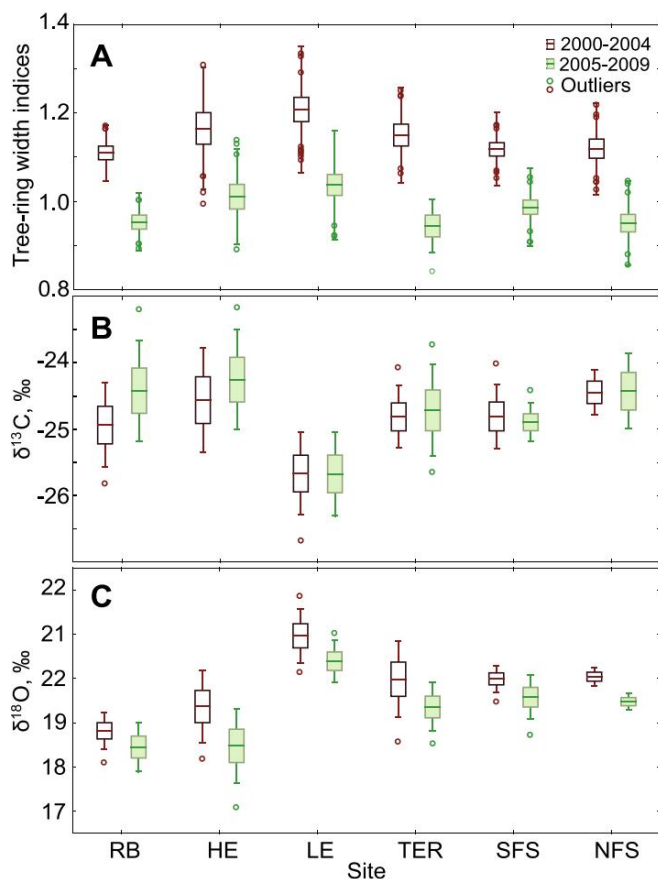


Рис. 5. Диаграмма размаха нескольких переменных: среднее значение (горизонтальная линия), стандартная ошибка (ящик), стандартное отклонение (усы) и выбросы (точки) для индексов ширины годовичных колец (А),  $\delta^{13}\text{C}$  (В) и  $\delta^{18}\text{O}$  (С) за два пятилетних периода: 2000–2004 и 2005–2009, характеризующихся различным количеством осадков летом.

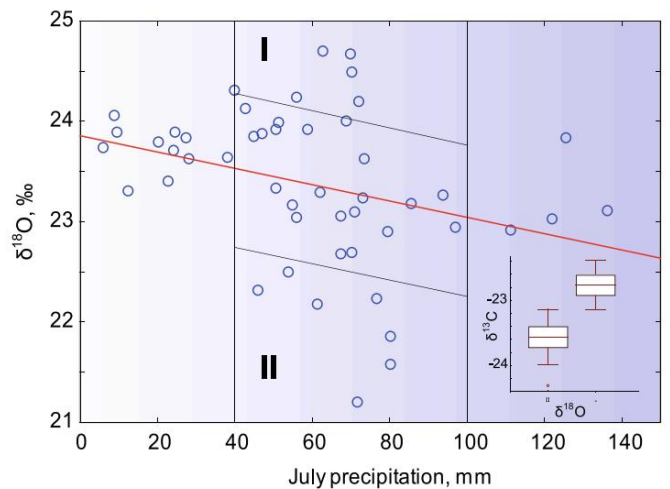


Рис. 6. Диаграмма рассеяния между  $\delta^{18}\text{O}$  и суммами осадков в июле за 1960–2018 гг., указывающая на отрицательную связь между переменными (красная сплошная линия). Вертикальные линии разделяют значения для лет с низким ( $< 40$  мм), средним (от 40 до 100 мм) и высоким ( $> 100$  мм) количеством осадков в июле. Группы I и II включают значения  $\delta^{18}\text{O}$ , которые намного выше и намного ниже соответственно средних значений  $\delta^{18}\text{O}$  для диапазона осадков 40–100 мм. На вставке представлена диаграмма размаха для значений  $\delta^{13}\text{C}$ , соответствующих  $\delta^{18}\text{O}$  из группы I с высокими значениями  $\delta^{18}\text{O}$  (I) и II с низкими значениями  $\delta^{18}\text{O}$  (II).

которые значительно выше и ниже среднего для рассматриваемого интервала осадков (отмечены как I и II на рис. 6). Значения  $\delta^{13}\text{C}$ , соответствующие этим двум группам отчетливо различающихся средних значений  $\delta^{18}\text{O}$  ( $\delta^{18}\text{O} = 24,4 \pm 0,2$  ‰ и  $22,00 \pm 0,5$  ‰ соответственно), также статистически разделены ( $P < 0,01$ ) (рис. 6, вставка), и это согласуется с положительной корреляцией между хронологиями изотопов углерода и кислорода ( $r = 0,49$ ,  $P < 0,001$ ). Индексы TRW немного, но не значительно, выше для группы изотопов кислорода I по сравнению с группой II (1,02 против 0,92,  $P = 0,86$ ).

#### 4. Обсуждение

Радиальный рост деревьев в северной Сибири, как правило, ограничен температурой (например, Ваганов и др., 1999; Кирдянов и др., 2007; Хеллман и др., 2016). Наши результаты показывают, что изменчивость TRW лиственницы Гмелина в северной тайге центральной Сибири, которая все еще находится в зоне сплошной вечной мерзлоты, в основном определяется летней температурой. Однако только июньские температуры, по-видимому, контролируют радиальный рост годовичных колец деревьев на наших участках исследования. В начале вегетационного периода AL тонкий, а температура верхнего слоя почвы низкая (Saurer et al., 2016), что в значительной степени определяется температурой воздуха. Позже в течение сезона температуры воздуха и почвы повышаются, AL становится непрерывно толще (Bryukhanova et al., 2015; Saurer et al., 2016), и прямое влияние температуры воздуха на радиальный рост деревьев уменьшается, оставаясь по-прежнему выраженным только в летних сезонных средних значениях (июнь–июль и летние температуры). Как правило, лиственницы успешно растут и восстанавливаются на вечной мерзлоте благодаря своим развитым поверхностным корневым системам (Каджимото и др., 2003; Каджимото, 2010; Кирдянов и др., 2012), которые обеспечивают доступ к воде и питательным веществам в верхнем талом слое почвы.

Тем не менее, сила реакции роста деревьев на температуру различается между участками (рис. 3). Самый сильный температурный сигнал наблюдался на участке с высокой высотой HE, расположенном ближе всего к региональной верхней границе леса, которая находится в диапазоне 900 м над уровнем моря. Этот результат согласуется с другими исследованиями, показывающими общую тенденцию к повышению чувствительности роста деревьев к температуре на больших высотах (например, Fritts, 1976; King et al., 2013; Kharuk et al., 2023a). Отрицательная реакция роста деревьев на температуру апреля, наблюдаемая на трех близких участках TER, SFS и NFS, может быть косвенно связана с ранней активацией камбия в теплых условиях в конце апреля и последующим заморозком

температуры, которые повреждают камбий (Ваганов и др., 2006; Шестакова и др., 2016). На более высоком участке НЕ такого эффекта не наблюдается, поскольку апрельские температуры там не достигают порога активации камбия (Заурер и др., 2016).

Влияние летних осадков было значимым только для хронологии ширины колец RB. Это наиболее продуктивный участок (таблица 2), который расположен на хорошо прогреваемых и дренируемых песчано-суглинистых почвах. Аналогичный климатический отклик ранее наблюдался в приросте годовых колец деревьев на участке с похожими почвенными условиями (Кирдянов и др., 2013). Тонкий органический слой (таблица 1) не блокирует перенос тепла из атмосферы, что определяет быстрый прогрев верхнего слоя почвы в начале вегетационного периода. В этом регионе корни лиственницы занимают органический слой почвы и проникают в тонкие верхние минеральные слои почвы (до 45 см в глубину для участков с мощным AL) (Kajimoto, 2010; собственные наблюдения). Высокая пористость и хороший дренаж почвы в RB объясняют быстрое снижение влажности почвы при высоком испарении и недостатке осадков в жаркие летние месяцы (Кирдянов и др., 2013), что приводит к более сильной зависимости роста деревьев от осадков и талых вод в AL в сухое лето (Сугимото и др., 2002; Заурер и др., 2016). Все остальные насаждения, развитые на суглинках с толстым изолирующим органическим слоем почвы, который существенно блокирует передачу тепла в почву, объясняют чувствительность роста деревьев к температуре. Эти результаты согласуются с более ранними выводами о разнообразии реакции роста деревьев на климат и демонстрируют важность почвенных условий для радиального роста деревьев на вечной мерзлоте (Николаев и др., 2011; Брюханова и др., 2013; Кирдянов и др., 2013, 2020b; Заурер и др., 2016; Кнорре и др., 2019; Чуракова и др., 2022).

Деревья на всех участках показывают значительно более высокий радиальный прирост в летний период 2000–2004 гг., который характеризуется высоким количеством летних осадков и относительно теплыми температурами июня. В среднем летние месяцы в период 2000–2004 гг. классифицируются SPEI как немного более влажные, чем в последующие пять лет и в интервале 1960–2018 гг. Однако годы 2005–2009 гг. являются периодом с летом, близким к среднему значению в период 1960–2018 гг. по обеспеченности водой. Поскольку значения изотопов углерода служат индикатором обеспеченности водой деревьев в бореальных лесах (Walker et al., 2015; Churakova-Sidorova et al., 2020a, b), отсутствие существенной разницы в значениях  $\delta^{13}\text{C}$  между двумя периодами (рис. 5A) также свидетельствует об отсутствии выраженных периодов засухи. В этих условиях потенциальное объяснение изменения значений  $\delta^{18}\text{O}$  между пятилетними периодами, в то время как  $\delta^{13}\text{C}$  остается относительно стабильным, заключается в изотопном составе исходной воды для деревьев, который влияет на кислород колец деревьев, но не на изотопы углерода (Song et al., 2022). Поскольку изотопный состав кислорода колец деревьев в зоне вечной мерзлоты в Сибири в значительной степени определяется исходной водой (Fan et al., 2021), на  $\delta^{18}\text{O}$  в целлюлозе колец деревьев может влиять подача изотопно обедненной воды из талой мерзлой почвы. Это может привести к «обратной» зависимости между климатом и изотопами колец деревьев, при этом сухие и теплые летние условия приводят к снижению значений  $\delta^{18}\text{O}$  (Saurer et al., 2002, 2016; Sugimoto et al., 2002).

Это противоречит текущему пониманию климатического сигнала  $\delta^{18}\text{O}$  в кольцах деревьев, которое предполагает более высокие значения  $\delta^{18}\text{O}$  в целлюлозе колец деревьев в более сухих условиях (Barbour and Farquhar, 2000). В нашем исследовании более низкие значения  $\delta^{18}\text{O}$  в период с меньшим количеством летних осадков с 2005 по 2009 год (рис. 5) указывают на более высокую долю изотопно более легкой воды. В регионе снег и талая вода AL сильно истощены по сравнению с летними осадками. Таким образом, среднее значение  $\delta^{18}\text{O}$  для зимних осадков составляет 33 ‰ и между 24 ‰ и –18 ‰ для сезонно мерзлой почвы в зависимости от участка по сравнению с 13 ‰ для среднего значения летних осадков (Saurer et al., 2016). Таким образом, снег и талая вода AL внесли достаточный вклад в качестве источника воды для деревьев в 2005–2009 годах, когда летние осадки были низкими, и образовались годовые кольца с обедненным  $\delta^{18}\text{O}$ . Напротив, возросший вклад более обильной дождевой воды в период 2000–2004 годов с повышенным количеством летних осадков зафиксирован в более высоких значениях  $\delta^{18}\text{O}$  в годовых кольцах, что приводит к обратной зависимости  $\text{H}_2^{18}\text{O}$ /температура, которая обнаруживается в соотношении изотопов кислорода в целлюлозе годовых колец.

Вывод о сложном взаимодействии талых и летних осадков подтверждается диаграммой рассеяния  $\delta^{18}\text{O}$  и июльских осадков (рис. 6), которая демонстрирует множественные сценарии содержания изотопов кислорода в целлюлозе годовых колец в диапазоне месячных осадков от 40 до 100 мм. Низкие значения  $\delta^{18}\text{O}$  в годовых кольцах (группа II, рис. 6) объясняются большей долей талых вод снега и AL в источнике водоснабжения деревьев (что согласуется с зависимостью  $\delta^{18}\text{O}$  в годовых кольцах от зимних осадков, рис. 4). В то же время более высокие, чем средние значения  $\delta^{18}\text{O}$  (группа I, рис. 6) совпадают с обогащенными значениями  $^{13}\text{C}$  (рис. 6, вставка) и указывают на более высокие скорости фотосинтеза, подтвержденные статистически незначимыми, но большими TRW (не показано) в условиях отсутствия засухи (взаимодействие между  $\delta^{13}\text{C}$  и  $\delta^{18}\text{O}$  объяснено в работах Schei-degger et al., 2000 и Siegwolf et al., 2023). Усиление радиального роста в 2000–2004 гг. (рис. 5A) с в целом более теплым июнем (рис. 2C) и большим количеством осадков в июне и июле (рис. 2D) может быть связано с более быстрым и глубоким оттаиванием AL из-за более высокой температуры воздуха и дополнительной передачи тепла в почву с осадками (Karjalainen et al., 2019) в начале вегетационного периода, критического интервала для развития годовых колец деревьев (Брюханова и др., 2013; Cuny et al., 2015). Этот анализ показывает полезность объединения информации о росте с изменениями изотопов углерода и кислорода для объяснения водных отношений в этих экосистемах.

В отличие от нашего исследования, в районе вечной мерзлоты в Восточной Сибири, где выпадает меньше осадков, чем в нашем регионе исследования, недавно разработанная модель трассера воды не указывает на вклад воды, образовавшейся глубоко в вечной мерзлоте, в транспирацию растений (Park et al., 2021). Эта модель, основанная на модели поверхности земли CHANGE, основанной на процессах, имитирующих импульс, тепло, воду, потоки углерода и физиологию растений в системе атмосфера–растительность–снег–почва (Park et al., 2011), указывает на то, что единственный вклад в транспирацию вносят дождь, снег и сезонно мерзлая почва, которая оттаивает летом. Аналогичным образом, в нашем регионе исследования вклад AL и воды от таяния предыдущего снега в водоснабжение деревьев также виден для хорошо прогреваемых почв с толстым AL и в основном для сухого лета (Saurer et al., 2016). Будущее изменение климата приведет к долгосрочному высыханию поверхностного слоя почвы в зоне вечной мерзлоты в Арктике, как предсказывают модели поверхности Земли (Andresen et al., 2020). Это может усилить роль глубокой вечной мерзлоты как источника воды для растительности, поскольку деревья развивают более глубокую корневую систему, когда AL толще (Kajimoto, 2010). Когда толщина AL значительно увеличивается, вечная мерзлота может оказаться неспособной поддерживать влажность почвы в верхнем слое почвы (Park et al., 2021; Peng et al., 2022), но роль осадков до вегетационного периода, включая предыдущий осенний дождь и снег, возрастет.

## 5. Выводы

Это исследование демонстрирует важность как атмосферных, так и эдафических условий для функционирования и продуктивности бореального леса, крупнейшего в мире наземного биома, в котором осадки и сезонно тающая вечная мерзлота совместно обеспечивают важнейшие водные ресурсы для роста деревьев. Однако это общее наблюдение может быть изменено экологией участка и изменчивостью климата. Тем не менее, мы сообщаем о доказательствах возросшей роли вечной мерзлоты как источника воды в теплое и сухое лето. Наши результаты подчеркивают силу стабильных изотопов годовых колец для раскрытия сложности реакций лесных экосистем на глобальное потепление.

## Заявление об авторском вкладе CRediT

Александр В. Кирдянов: Концептуализация, Получение финансирования, Расследование, Методология, Ресурсы, Визуализация, Написание – оригинальный черновик, Написание – рецензирование и редактирование. Маттиас Заурер: Получение финансирования, Методология, Ресурсы, Написание – рецензирование и редактирование. Альберто Арзак: Получение финансирования, Расследование, Написание – рецензирование и редактирование. Анастасия А. Кнорре: Расследование, Написание – рецензирование и редактирование. Анатолий С. Прокушкин: Расследование, Методология, Написание – рецензирование и редактирование. Ольга В. Чуракова (Сидорова): Расследование, Написание –

А.В. Кирдянов и др.

Наука об окружающей среде 912 (2024) 168858

Рецензирование и редактирование. Тито Арозио: Визуализация, Написание – рецензирование и редактирование. Татьяна Бебчук: Визуализация, Написание – рецензирование и редактирование. Рольф Зигвольф: Получение финансирования, Методология, Ресурсы, Написание – повторное рецензирование и редактирование. Ульф Бюнтген: Получение финансирования, Написание – первоначальный черновик, Написание – рецензирование и редактирование.

Декларация о конфликте интересов

Авторы заявляют, что у них нет известных им конкурирующих финансовых интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в настоящей статье.

Наличие данных

Данные будут предоставлены по запросу.

Благодарности

Работа поддержана Российским научным фондом (РНФ), грант № 22-14-00048. Для подготовки образцов древесины использовалось оборудование, приобретенное в рамках проектов Министерства образования и науки Российской Федерации FSRZ-2023-0007 и FSRZ-2020-0014. UB получил финансирование из гранта Чешского научного фонда HYDRO8 (23-08049S) и гранта ERC Advanced MONOSTAR (AdG 882727). Четыре анонимных рецензента любезно предоставили полезные комментарии и предложения.

Ссылки

Абаимов А.П., Бондарев А.И., Зырянова О.А., Шитова С.А., 1997. Полярные леса Красноярский край. Наука, Новосибирск, с. 208 (на русском языке).

Андерсен, К. Г., Лоуренс, Д. М., Уилсон, К. Дж., Макгуайр, А. Д., Ковен, К., Шефер, К., Джафаров, Э., Пэн, С., Чен, Х., Гуттевен, И., Берк, Э., Чадберн, С., Цзи, Д., Чен, Г., Хейс, Д., Чжан, В., 2020. Прогнозы влажности почвы и гидрологии региона вечной мерзлоты – сравнение моделей. Криосфера 14, 445–459. <https://doi.org/10.5194/tc-14-445-2020> .

Анисимов, О.А., 2007. Потенциальная обратная связь таяния вечной мерзлоты с глобальным климатом системы через выбросы метана. Environ. Res. Lett. 2, 045016. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/2/4/045016>.

Анисимов, О., Ренева, С., 2006. Вечная мерзлота и меняющийся климат: Российская перспектива. Амбิโอ 35 (4), 169–175.

Baltzer, J.L, Veness, T., Chasmer, L.E, Sniderhan, A.E, Quinton, W.L, 2014. Леса на тающей вечной мерзлоте: фрагментация, краевые эффекты и чистая потеря лесов. Glob. Chang. Биол. 20, 824–834. <https://doi.org/10.1111/gcb.12349>.

Барбер, В. А., Джудей, Г. П., Финни, Б. П., 2000. Снижение роста ели белой на Аляске в двадцатом веке из-за стресса, вызванного засухой из-за перепадов температур. Nature 405 (6787), 668–673. <https://doi.org/10.1038/35015049>.

Барбур, ММ, Фархукар, ГД, 2000. Изменение соотношений изотопов углерода и кислорода в листьях хлопчатника, вызванное относительной влажностью и АБК. Plant Cell Environ. 23, 473–485. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.2000.00575.x>.

Belmecheri, S., Lavergne, A., 2020. Сбор данных о концентрациях CO2 в атмосфере и стабильных изотопах углерода для реконструкции климата и получения экофизиологических индексов растений из годовичных колец. Dendrochronologia 63, 125748. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2020.125748>.

Бискаборн Б.К., Смит С.Л., Ноецли Дж., Маттес Х., Виейра Г., Стрелецкий Д.А., Шенейх П., Романовский В.Е., Левкович А.Г., Абрамов А., Аллард М., Бойке Дж., Кейбл В.Л., Кристиансен Х.Х., Делалей Р., Дикманн Б., Дроздов, Д., Этцельмоллер Б., Гросс Г., Гульельмин М., Ингеман-Нильсен Т., Исааксен Т., Исикава М., Йоханссон М., Йоханссон Х., Джу А., Каверин Д., Холодов А., Константинов П., Крогер Т., Ламбель К., Жан-Ланкман П., Луо Д., Малкова, Г., Мейкледжон И., Москаленко Н., Олива М., Филлипс М., Рамос М., Саннел, АБК, Сергеев Д., Сейболд К., Скрябин П., Васильев А. ., Ву, К., Ёсикава, К., Железняк, М., Лантуит, Х., 2019. Вечная мерзлота – это потепление в глобальном масштабе. Нат.

Коммун. 10, 264. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-08240-4>.

Брандт, Дж. П., Флэнниган, М. Д., Мейнард, Д. Г., Томпсон, И. Д., Волни, В. Дж. Джа., 2013. Введение в boreальную зону Канады: экосистемные процессы, здоровье, устойчивость и проблемы окружающей среды. Environ. Rev. 21, 207–226. <https://doi.org/10.1139/er-2013-0040> .

Бриффа, К. Р., Джонс, П. Д., Швайнгрубер, Ф. Х., Осборн, Т. Дж., 1998. Влияние вулканических извержений на летнюю температуру в Северном полушарии за последние 600 лет. Природа 393, 450–455. <https://doi.org/10.1038/30943>.

Циркум-арктическая карта вечной мерзлоты и состояния грунтового льда. Вашингтон, округ Колумбия: США В: Brown, J., Ferrians Jr., OJ, Heginbottom, JA, Melnikov, ES (ред.), 1997. Геологическая служба совместно с Тихоокеанским советом по энергетике и минеральным ресурсам. Серия карт Тихоокеанского региона CP-45, масштаб 1:10 000 000, 1 лист. <https://doi.org/10.3133/cp45>.

Брюханова М.В., Кирдянов А.В., Прокушкин А.С., Силкин П.П., 2013. Специфика Особенности ксилогенеза у лиственницы даурской Larix gmelinii (Rupr.) Rupr., произрастающей на вечномёрзлых почвах Средней Сибири. Расс. Дж. Экол. 44 (5), 361–366. <https://doi.org/10.1134/S1067413613050044> .

Брюханова М.В., Фонти П., Кирдянов А.В., Зигвольф Р.Т., Заурер М., Почебыт, Н.П., Чуракова (Сидорова), О.В., Прокушкин, А.С., 2015. Реакция δ13C, δ18O и анатомии клеток годовичных колец Larix gmelinii на различную глубину активного слоя почвы. Дендрохронология 34, 51–59. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2015.05.002>.

Бюнтген У., Арсено Д., Буше Э., Чуракова (Сидорова) О.В., Дженнаретти Ф., Кривелларо А., Хьюз М.К., Кирдянов А.В., Клиппель Л., Крушич П.Дж., Линдерхольм , Х.В., Юнгквист, ФК, Людешер, Дж., Макормик, М., Миглан, В.С., Николусси К., Пьерматтей А., Оппенгеймер К., Рейниг Ф., Зигль М., Ваганов Э.А., Эспер Дж., 2020. Выдающаяся роль вулканизма в изменчивости климата нашей эры и истории человечества. Дендрохронология 64, 125757. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2020.125757>.

Бюнтген, У., Аллен, К., Анчукайтис, К., Арсено, Д., Буше, Э., Браунинг, А., Чаттерджи, С., Керубини, П., Чуракова (Сидорова), О.В., Корона, К. ., Дженнаретти Ф., Гриссингер Ж., Гийе С., Гюи Ж., Гуннарссон Б., Хелама, С., Хохройтер П., Хьюз М.К., Хайберс П., Кирдянов А.В., Крушич П.Дж., Людешер Дж., Мейер У.Дж.-Х., Миглан В.С., Николусси К., Оппенгеймер К., Рейниг Ф., Зальцер М.В., Сефтиген К., Стайн А.Р., Стоффель М., Джордж, С.Ст., Техедор, Е., Trevino, A., Trouet, V., Wang, J., Wilson, R., Yang, B., Xu, G., Esper, J., 2021a. Влияние принятия решений в древесных кольцах основанные на климатических реконструкциях. Nat. Commun. 12, 3411. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-23627-6>.

Бюнтген, У., Кирдянов, А.В., Крушич, П.И., Шишов, В.В., Эспер, Й., 2021b. Арктические аэрозоли и «проблема дивергенции» в дендроклиматологии. Dendrochronologia 67, 125837. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2021.125837>.

Чуракова (Сидорова), О.В., Портер, Т.Я., Жарков М.С., Фонти, М.В., Баринов В.В., Тайник, А.В., Кирдянов А.В., Кнорре, А.А., Верманн М., Трушкина, Т.В., Кошурикова, Н.Н., Ваганов, Э.А., Миглан В.С., Зигвольф, РТВ, Заурер М., 2023. Влияние климата на стабильные изотопы в кольцах деревьев в boreальной зоне Северного полушария. Sci. Total Environ. 870, 161644 <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161644>.

Чуракова, О.В., Портер, Т.Дж., Кирдянов, А.В., Миглан, В.С., Фонти, М.В., Ваганов, Е.А., 2022. Стабильные изотопы в кольцах деревьев boreальных лесов. В: Siegwolf, RTW, Brooks, J. Р., Роден, Дж., Заурер, М. (ред.), Стабильные изотопы в кольцах деревьев. Springer, Cham., Физиология деревьев, 8, стр. 581–603. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-92698-4\\_20](https://doi.org/10.1007/978-3-030-92698-4_20).

Чуракова-Сидорова, О.В., Линерт, С., Тимофеева, Г., Зигвольф, Р., Роден, Й., Йоос, Ф., Заурер, М., 2020a. Измеренное и смоделированное значение δ18O исходной воды на основе целлюлозы годовичных колец лиственницы и сосны из зоны вечной мерзлоты. iForest 13, 224–229. <https://doi.org/10.3832/ifer3212-013>.

Чуракова-Сидорова О.В., Корона К., Фонти М.В., Гийе С., Заурер М., Зигвольф Р.Т. W., Stoffel, M., Vaganov, EA, 2020b. Недавнее атмосферное высыхание в Сибири не является беспрецедентным за последние 1500 лет. Sci. Rep. 10, 15024. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-71656-w>.

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

Куни, Х., Ратгебер, К., Франк, Д., Фонти, Патрик, Мёнакинен, Х., Прислан, П., Росси, С., дель Кастильо, Э.М., Кампело, Ф., Ваврич, Х. , Камареро, Ж.Дж., Брюханова, М.В., Йиске, Т., Гричар, Ж., Грыц, В., Де Луис, М., Виейра Ж., Чуфар К., Кирдянов А.В., Оберхубер В., Трельм В., Хуанг Ж.-Г., Ли Х., Свидрак И., Делорье А., Лян Э., Нойд П., Грубер А., Набаис К., Морен Х., Краузе К., Кинг Г., Фурнье, М., 2015. Производство древесной биомассы отстает от увеличения толщины ствола более чем на месяц в хвойных лесах. Nat. Plants 1, 15160. <https://doi.org/10.1038/nplants.2015.160>.

Davi, NK, Jacoby, GC, Wiles, GC, 2003. Изменчивость boreальной температуры, выведенная из данных о максимальной плотности поздней древесины и ширине годовичных колец, регион горы Врангель, Аляска. Quat. Res. 60 (3), 252–262. <https://doi.org/10.1016/j.yqres.2003.07.002>.

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

Фан, Р., Шимада, Х., Тей, С., Максимов, Т.С., Сугимото, А., 2021. Изотоп кислорода Состав целлюлозы в ранней древесине Larix sajanensis определяется источником воды, а не обогащением листьев водой в экосистеме вечной мерзлоты, Восточная Сибирь. Еур. J. Сосудистая эндovasкулярная хирургия 126, e2020JG006125 <https://doi.org/10.1029/2020JG006125>.

Фонти М.В., Тычков И.И., Чуракова (Сидорова) О.В. 2021. Внутрисезонная климатическая ситуация. Сигнал в годовичных кольцах хвойных деревьев в зоне вечной мерзлоты Сибири. Рус. ж. эколог. 52, 412–418. <https://doi.org/10.1134/S1067413621050064>.

Fritts, HC, 1976. Годичные кольца и климат. Acad. Press, Лондон; Нью-Йорк, Сан-Франциско. Франциско, стр. 576.

Готье С., Бернье П., Кулувайнен Т., Швиденко А.З., Щепаченко Д.Г., 2015. Здоровье boreальных лесов и глобальные изменения. Science 349 (6250), 819–822. <https://www.science.org/doi/10.1126/science.aaa9092>.

Гетц, С.Дж., Мак, М.К., Герни, К.Р., Рендерсон, Дж.Т., Хоутон, Р.А., 2007. Реакция экосистемы на недавние изменения климата и пожары в северных высоких широтах: наблюдения и результаты моделирования, сравнивающие северную Евразию и Северную Америку. Письмо по охране окружающей среды 2, 045031 <https://doi.org/10.1088/1748-9326/2/4/045031>.

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

Хантемиров, Р.М., Корона, К., Гийе, С., Шиятов, С.Г., Стоффель, М., Осборн, Т.Дж., Мельвин Т.М., Горланова Л.А., Кукарских В.В., Сурков А.Ю., фон Аркс Г., Фонти П.,



2022. Текущее потепление в Сибири беспрецедентно за последние семь тысячелетий. Нат. Коммун. 13, 4968. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-32629-x>.

Heijmans, MPM, Magnússon, R.L, Lara, MJ, Frost, GV, Myers-Smith, IH, van Huissteden, J., Jorgenson, MT, Fedorov, AN, Epstein, HE, Lawrence, DM, Limpens, J., 2022. Изменение растительности тундры и воздействие на вечную мерзлоту. Nat. Rev. Окружающая среда Земли. 3, 68–84. <https://doi.org/10.1038/s43017-021-00233-0>.

Хельбиг М., Паппас К., Зоннентег О., 2016. Оттепель вечной мерзлоты и лесные пожары: в равной степени важные факторы изменения бореального древесного покрова на равнинах Тажной зоны. Канада. Geophys. Res. Lett. 43, 1598–1606. <https://doi.org/10.1002/2015GL067193>.

Хеллманн Л., Агафонов Л., Юнгквист Ф.К., Чуракова (Сидорова) О., Дютхорн Э., Эспер, Й., Хюльсманн, Л., Кирдянов, А.В., Моисеев, П., Мыглан, В.С., Николаев, А.Н., Рейниг, Ф., Швайнгрубер, Ф.Х., Соломина, О., Тегель, В., Бюнтген, У., 2016. Разнообразные тенденции роста и климатические реакции в бореальных лесах Евразии. Экологические исследования. Летт. 11, 074021 <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/7/074021>.

Якоби, Г.С., Д'Арриго, Р.Д., 1995. Ширина и плотность годовичных колец деревьев как свидетельство климатических и потенциальных изменений лесов на Аляске. Glob. Biogeochem. Cycles 9 (2), 227–234. <https://doi.org/10.1029/95GB00321>.

Йоргенсон, М.Т., Остеркамп, Т.Е., 2005. Реакция бореальных экосистем на различные режимы деградации вечной мерзлоты. Can. J. For. Res. 35, 2100–2111. <https://doi.org/10.1139/x05-153>.

Каджимото, Т., 2010. Развитие корневой системы лиственниц, растущих на территории Сибири. вечная мерзлота. В: Осава А., Зырянова О., Мацура Ю., Каджимото Т., Вейн Р. (ред.), Экосистемы вечной мерзлоты, Экологические исследования, т. 209. Springer, Дордрехт, стр. 303–330. [https://doi.org/10.1007/978-1-4020-9693-8\\_16](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-9693-8_16).

Каджимото Т., Мацура Ю., Осава А., Прокушкин А.С., Софоронов М.А., Абаимов А.П., 2003. Развитие корневой системы деревьев Larix gmelinii под влиянием микромасштабных условий вечной мерзлоты в Центральной Сибири. Растительная почва 255, 281–292. <https://doi.org/10.1023/A:1026175718177>.

Карьялайнен, О., Луото, М., Аалто, Й., Хьорт, Й., 2019. Новые взгляды на факторы окружающей среды, контролирующей тепловой режим почвы в Северном полушарии: сравнение между вечной мерзлотой и не вечной мерзлотой. Криосфера 13, 693–707. <https://doi.org/10.5194/tc-13-693-2019>.

Килинг, С.Д., 1979. Эффект Зюсса: взаимосвязи углерода 13 и углерода 14. Окружающая среда. Int. 2, 229–300. [https://doi.org/10.1016/0160-4120\(79\)90005-9](https://doi.org/10.1016/0160-4120(79)90005-9).

Харук, В.И., Петров, И.А., Голыков, А.С., Двинская, М.Л., Им, С.Т., Шушпанов, А.С., 2023а. Рост лиственницы в условиях температурных и влажных градиентов в горах Сибири. J. Mt. Sci. 20, 101–114. <https://doi.org/10.1007/s11629-022-7433-3>.

Харук, В.И., Петров, И.А., Им, С.Т., Голыков, А.С., Двинская, М.Л., Шушпанов, А.С., Савченко, А.П., Термерова, В.Л. Растительность субарктики под влиянием смешанного потепления и загрязнения воздуха. Леса 14 (3), 615. <https://doi.org/10.3390/f14030615>.

Кинг, Г.М., Гутерли, Ф., Фонт, П., Фрэнк, Д.К., 2013. Реакция роста деревьев вдоль градиента высоты: климат или генетика? Экология 173, 1587–1600. <https://doi.org/10.1007/s00442-013-2696-6>.

Кирдянов, А.В., Ваганов, Е.А., Хьюз, М.К., 2007. Разделение климатического сигнала по данным о ширине годовичных колец и максимальной плотности поздней древесины. Деревья 21 (1), 37–44. <https://doi.org/10.1007/s00468-006-0094-y>.

Кирдянов, А.В., Трейде, К.С., Николаев, А., Хелле, Г., Шлезер, Г.Х., 2008. Климатические сигналы в ширине годовичных колец, плотности древесины и δ13C лиственниц Восточной Сибири (Россия). Химия и геол. 252, 31–41. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2008.01.023>.

Кирдянов А.В., Хагедорн Ф., Кнорре А.А., Федотова Е.В., Ваганов Е.А., Наурзабаев, М.М., Моисеев, П.А., Риглинг, А., 2012. Продвижение границы леса в 20 веке и изменения растительности вдоль высотного трансекта в горах Путорана, север Сибири. Борей 41 (1), 56–67. <https://doi.org/10.1111/j.1502-3885.2011.00214.x>.

Кирдянов, А.В., Прокушкин, А.С., Табакова, М.А., 2013. Годичный прирост лиственницы Гмелина в контрастных локальных условиях севера Средней Сибири. Дендрохронология 31, 114–119. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2012.10.003>.

Кирдянов, А.В., Мыглан, В.С., Пименов, А.В., Кнорре, А.А., Экарт, А.К., Ваганов, Е.А. Динамика отмирания лиственницы сибирской под воздействием загрязняющих веществ, выбрасываемых предприятиями Норильска // Современные проблемы экологии и природопользования. 7 (6), 679–684. <https://doi.org/10.1134/S1995425514060055>.

Кирдянов А.В., Пьерматтей А., Колар Т., Рыбничек М., Крушич П.Я., Николаев А.Н., Рейниг Ф., Бюнтген У., 2018. Замечания по оптимальной стратегии отбора проб в дендроклиматологии. Дендрохронология 52, 162–166. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2018.10.002>.

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

Кирдянов А.В., Заурер М., Зигвольф Р., Кнорре А.А., Прокушкин А.С., Чуракова О. V., Fonti, M, Bütngen, U., 2020b. Долгосрочные экологические последствия лесных пожаров в зоне сплошной вечной мерзлоты Сибири. Environ. Res. Lett. 15, 034061 <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab7469>.

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. <https://doi.org/10.1007/s00442-005-0248-4>.

Кнорре, А.А., Кирдянов, А.В., Прокушкин, А.С., Крушич, П.И., Бюнтген, У., 2019. Реконструкция долгосрочного влияния лесных пожаров на динамику деятельного слоя вечной мерзлоты в Центральной Сибири на основе годовичных колец. Sci. Total Environ. 652, 314–319. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.124>.

Кнорре А.А., Зигвольф Р.Т.В., Кирдянов А.В., Заурер М., Сидорова О.В., Прокушкин, А.С., 2022. Пожар как основной фактор динамики роста деревьев и устойчивости

Изменения 13C и 18O в лиственнице в зоне вечной мерзлоты. Леса 13, 725. <https://doi.org/10.3390/f13050725>.

Ковен, К.Д., Рингевал, Б., Фридригштейн, П., Чиаис, П., Кадуле, П., Хворостянов, Д., Криннер, Г., Тарнокай, К., 2011. Обратная связь между углеродом и климатом вечной мерзлоты ускоряет глобальное потепление. PNAS 108 (36), 14769–14774. <https://doi.org/10.1073/pnas.110391010>.

Кривоногова Н.Ф., Кондратьева К.А., 1989. Геокриогенные условия Тунгусо-Вилуйского региона. В кн.: Ершов Э.Д. (ред.), Геокриология СССР. Издательство «Недра», Москва, Средняя Сибирь, стр. 214–227 (на русском языке).

Лоуренс, Д.М., Ковен, К.Д., Свенсон, С.К., Райли, У.Дж., Слейтер, А.Г., 2015. Таяние вечной мерзлоты и вызванные этим изменения влажности почвы регулируют прогнозируемые выбросы CO2 и CH4 в высоких широтах. Environ. Res. Lett. 10, 094011 <https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/9/094011>.

Левеск М., Андреу-Хейлс Л., Д'Арриго Р., Олкерс Р., Баки Б.М., 2023. Нелинейный рост и физиологические реакции белой ели на границе леса в Северной Америке и Арктике. Eur. J. Vasc. Endovasc. Surg. 128, e2022JG007096 <https://doi.org/10.1029/2022JG007096>.

Ли, И., Лю, Х., Чжу, С., Юэ, И., Сюэ, Дж., Ши, Л., 2021. Как деградация вечной мерзлоты угрожает росту бореальных лесов на ее южной окраине? Sci. Total Environ. 762, 143154 <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143154>.

Li, W., Manzanedo, RD, Jiang, Y., Ma, W., Du, E., Zhao, S., Rademacher, T., Dong, M., Xu, H., Kang, X., Wang, J., Wu, F., Cui, X., Pederson, N., 2023a. Переоценка связей роста и климата указывает на потенциальную возможность снижения в бореальных лиственных лесах Евразии. Nat. Commun. 14, 3358. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-39057-5>.

Ли, В., Янь, Д., Ван, Б., Чжу, Л., 2023b. Прогресс в исследовании гидрологических последствий деградации вечной мерзлоты в Северном полушарии. Geoderma 438, 116629. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116629>.

Николаев А.Н., Федоров П.П., Десяткин А.Р. Влияние гидротермических условий многолетнемерзлых почв на радиальный прирост лиственницы и сосны в Центральной Якутии // Совр. Пробл. Экол. 4, 140–149. <https://doi.org/10.1134/S1995425511020044>.

Огден, Э.Л., Камминг, С.Г., Смит, С.Л., Турецкий, М.Р., Балтцер, Дж.Л., 2023. Таяние вечной мерзлоты вызывает краткосрочное увеличение продуктивности растительности на северо-западе Канады. Global Chang Biol. 29, 5352–5366. <https://doi.org/10.1111/gcb.16812>.

Олс, К., Клесс, С., Жирарден, М.П., Эванс, М.К., ДеРоуз, Р.Дж., Труэ, В., 2023. Удаление тренда из климатических данных перед анализом связи между климатом и ростом в дендрохронологии: общепринятая передовая практика? Dendrochronologia 79, 126094. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2023.126094>.

Панюшкина, И. П., Арбатская, М. К. Дендрохронологический подход к изучению горимости лесов Эвенкии (Сибирь) // Сибирский экологический журнал, 2000, т. 2, № 2, с. 167–173.

Парк, Х., Иидзима, Й., Ябуки, Х., Охта, Т., Уолш, Дж., Кодама, Й., Охата, Т., 2011. Применение сопряженной гидрологической и биогеохимической модели (CHANGE) для моделирования обмена энергией, водой и CO2 в лиственном лесу в Восточной Сибири. J. Geophys. Res. 116, D15102. <https://doi.org/10.1029/2010JD015386>.

Пак, Х., Таноуэ, М., Сугимото, А., Ичинанаги, К., Ивахана, Г., Хияма, Т., 2021. Количественное разделение осадков и мерзлотных вод, используемых для эвапотранспирации в бореальном лесу: численное исследование с использованием модели трассера. Eur. J. Сосудистая эндоваккулярная хирургия 126, e2021JG006645 <https://doi.org/10.1029/2021JG006645>.

Peng, R., Liu, H., Anenkhonov, OA, Sandanov, DV, Korolyuk, AY, Shi, L., Xu, C., Dai, J., Wang, L., 2022. Рост деревьев связан с распространением и деградацией вечной мерзлоты в южной Сибири, вызванной потеплением. Glob. Chang. Biol. 28, 5243–5253. <https://doi.org/10.1111/gcb.16284>.

Подкомитет по вечной мерзлоте, 1988. Глоссарий терминов по вечной мерзлоте и связанным с ней терминам по грунтовому льду. В: Ассоциированный комитет по геотехническим исследованиям, Национальный исследовательский совет Канады, Оттава, Технический меморандум № 142, 156 стр.

Портер, Т.Дж., Писарик, М.Ф.Дж., Кокель, С.В., Эдвардс, Т.В.Д., 2009. Климатические сигналы в δ13C и δ18O колец деревьев белой ели в районе дельты Маккензи, Северная Канада. Arct. Antarct. Alp. Res. 41 (4), 497–505. <https://doi.org/10.1657/1938-4246.41.4.497>.

Прокушкин А.С., Хагедорн Ф., Покровский О.С., Вирс Дж., Кирдянов А.В., Масягина, О.В., Прокушкина, М.П., Макдауэлл, У.Х., 2018. Режим вечной мерзлоты влияет на состояние питания и продуктивность лиственниц в Центральной Сибири. Леса 9, 314. <https://doi.org/10.3390/f9060314>.

Ринн, Ф., 2003. TSAP-Win – Анализ временных рядов и представление дендрохронологии и связанных с ней приложений. Фрэнк Ринн, Гейдельберг.

Ринне К.Т., Заурер М., Кирдянов А.В., Брюханова М.В., Прокушкин А.С., Чуракова (Сидорова), О.В., Зигвольф, Р.Т.В., 2015а. Изучение реакции углеводов хвои сибирской лиственницы на климат с использованием анализа δ13C и концентрации, специфичных для соединений. Plant Cell Environ. 38, 2340–2352. <https://doi.org/10.1111/pce.12554>.

Ринне, К.Т., Заурер, М., Кирдянов, А.В., Лоадер, Н., Брюханова, М.В., Вернер, Р., Зигвольф, Р.Т.В., 2015b. Связь между отношениями изотопов углерода в игольчатом сахаре и годовичными кольцами сибирской лиственницы. Физиология деревьев. 35, 1192–1205. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpv096>.

Заурер, М., Боррела, С., Швайнгрубер, Ф., Зигвольф, Р., 1997. Стабильные изотопы углерода в кольцах деревьев бука: климатические и связанные с местоположением влияния. Деревья 11, 291–297. <https://doi.org/10.1007/s004680050087>.

Заурер, М., Швайнгрубер, Ф., Ваганов, Е.А., Шиятов, С.Г., Зигвольф, Р., 2002. Пространственные и временные тренды изотопов кислорода на северной границе леса в Евразии. Geophys. Res. Lett. 29 (9), 1296. <https://doi.org/10.1029/2001GL013739>.

Saurer, M., Kirdyanov, AV, Prokushkin, AS, Rinne, KT, Siegwolf, RTW, 2016. Влияние обратной климато-изотопной зависимости в почвенной воде на изотопно-кислородный состав Larix gmelinii в Сибири. New Phytol. 209, 955–964. <https://doi.org/10.1111/nph.13759>.

Шефер, К., Чжан, Т., Брухвилер, Л., Барретт, А.П., 2011. Количество и время  
Выделение углерода из вечной мерзлоты в ответ на потепление климата. *Tellus B* 6, 165–180.  
<https://doi.org/10.1111/j.1600-0889.2011.00527.x>.

Шайдеггер, Ю., Заурер, М., Бан, М., Зигвольф, Р., 2000. Связь стабильных изотопов кислорода и углерода с  
устычной проводимостью и фотосинтетической способностью: концептуальная модель.  
*Oecologia* 125, 350–357. <https://doi.org/10.1007/s004420000466>.

Шур, ЕАГ, МакГуайр, А.Д., Шадель, К., Гросс, Г., Харден, Дж.В., Хейс, Д.Д.,  
Хугелиус Г., Ковен С.Д., Кухри П., Лоуренс Д.М., Натали С.М., Олефельдт Д., Романовский В.Е.,  
Шефер К., Турецкий М.Р., Трит, СС, Вонк Дж.Э., 2015.  
Изменение климата и обратная связь углерода вечной мерзлоты. *Nature* 520, 171–179. <https://doi.org/10.1038/nature14338>.

Шестакова Т.А., Гутьеррес Э., Кирдянов А.В., Камареро Дж.Дж., Дженова М., Кнорре А.  
А., Linares, J.C, de Dios, V.R, S'anchez-Salguero, R., Voltas, J., 2016. Леса синхронизируют свой  
рост в контрастных регионах Евразии в ответ на потепление климата. *PNAS* 113 (3), 662–667.  
<https://doi.org/10.1073/pnas.1514717111>.

Shi, L., Liu, H., Wang, L., Peng, R., He, H., Liang, B., Cao, J., 2024. Переходные реакции роста деревьев на  
потепление климата на самой южной границе распространения вечной мерзлоты в высоких широтах.  
*Sci. Total Environ.* 908, 168503 <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168503>.

Шишов В.В., Тычков И.И., Попкова М.И., Ильин В.А., Брюханова М.В., Кирдянов А.  
В., 2016. VS-осциллограф: новый инструмент для параметризации радиального роста деревьев на  
основе климатических условий. *Dendrochronologia* 39, 42–50. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2015.10.001>.

Сидорова О.В., Зигвольф Р.Т.В., Заурер М., Шашкин А.В., Кнорре А.А.,  
Прокушкин А.С., Кирдянов А.В., 2009. Тенденции столетних годовичных колец и стабильных изотопов *Larix  
gmelinii* (Rupr.) Rupr. свидетельствуют об увеличении дефицита воды на сибирском севере? *Экология*  
*Sci. Total Environ.* 908, 168503 <https://doi.org/10.1007/s00442-009-1411-0>.

Сидорова О.В., Зигвольф Р.Т.В., Заурер М., Наурзабаев М.М., Шашкин А.В.,  
Ваганов, Е.А., 2010. Пространственные закономерности климатических изменений на севере Евразии,  
отраженные в параметрах годовичных колец и стабильных изотопах лиственницы сибирской. *Глобальный вестник.*  
*Биол.* 16, 1003–1018. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.02008.x>.

Сидорова, О.В., Заурер, М., Мыглан, В.С., Эйхлер, А., Швиковский, М., Кирдянов, А.В., Брюханова, М.В.,  
Герасимова, О.В., Калугин, И.А., Дарын, А.В., Зигвольф, RTW, 2012. Многопрокси-подход для выявления  
современных климатических изменений на территории Российского Алтая. *Климатическая динамика.*  
38, 175–188. <https://doi.org/10.1007/s00382-010-0989-6>.

Зигвольф, Р.Т.В., Леманн, М.М., Голдсмит, Г.Р., Чуракова (Сидорова), О.В.,  
Mirande-Ney, C., Timoveeva, G., Weigt, R.B, Saurer, M., 2023. Обновление модели двойного изотопного  
углерода и кислорода — газообмена: концепция для понимания реакции растений на окружающую  
среду и ее последствий для годовичных колец деревьев. *Plant Cell Environ.* 46 (9), 2606–2627.  
<https://doi.org/10.1111/pce.14630>.

Song, X., Lorrey, A., Barbour, M.M, 2022. Экологические, физиологические и биохимические процессы,  
определяющие соотношение изотопов кислорода в древесной целлюлозе. В: Siegwolf, R.  
TW, Брукс, Дж. Р., Роден, Дж., Заурер, М. (ред.), *Стабильные изотопы в кольцах деревьев*.  
Springer, Cham., *Физиология деревьев*, т. 8, стр. 311–329. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-92698-4\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-030-92698-4_10).

Стайн, А., Хайберс, П., 2014. Арктические кольца деревьев как регистраторы изменений  
доступности света. *Nat. Commun.* 5, 3836. <https://doi.org/10.1038/ncomms4836>.

Сугимото, А., 2019. Стабильные изотопы воды в экосистеме вечной мерзлоты. В: Охта, Т.,  
Хияма, Т., Иидзима, Й., Котани, А., Максимов, Т. (ред.), *Динамика воды и углерода в Восточной  
Сибири*. Springer, Singapore *Ecological Studies*, т. 236, стр. 135–151. [https://doi.org/10.1007/978-981-13-6317-7\\_6](https://doi.org/10.1007/978-981-13-6317-7_6).

Сугимото, А., Янагисава, Н., Найто, Д., Фудзита, Н., Максимов, Т.С., 2002. Значение вечной мерзлоты как  
источника воды для растений в восточносибирской тайге. *Ecol. Res.* 17, 493–503. <https://doi.org/10.1046/j.1440-1703.2002.00506.x>.

Тей С., Морозуми Т., Нагаи С., Такано С., Сугимото А., Шингубара Р., Фан Р.,  
Федоров, А., Гаврильева, Т., Тананаев, Н., Максимов, Т., 2020. Экстремальное наводнение,  
вызванное сильным снегопадом в бассейне реки Индигирка на северо-востоке Сибири.  
*Гидрол. Процессы*. 34, 522–537. <https://doi.org/10.1002/hyp.13601>.

Тойфель, Б., Сушама, Л., 2019. Резкие изменения в районе вечной мерзлоты Арктики  
поставить под угрозу развитие севера. *Nat. Clim. Chang.* 9, 858–862. <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0614-6>.

Турецкий, М. Р., Эбботт, Б. В., Джонс, М. К., Уолтер, А. К., Олефельдт, Д., Шур, Е. А. Г., Ковен, К.,  
Макгуайр, А. Д., Гроссе, Г., Кюрц, П., Хугелиус, Г., Лоуренс, Д. М., Гибсон, К., Саннел, А. Б. К.,  
2019. Разрушение вечной мерзлоты ускоряет выбросы углерода.  
*Природа* 569, 32–34. <https://doi.org/10.1038/d41586-019-01313-4>.

Ваганов, Е.А., Кирдянов, А.В., 2010. Денхрохнология лиственниц, произрастающих на  
Сибирская вечная мерзлота. В: Осав, А., Зырянова О.А., Мацуура Ю., Кадзимото Т., Вейн Р.В.  
(ред.), *Экосистемы вечной мерзлоты: сибирские лиственничные леса*. Springer-Verlag, Берлин,  
Гейдельберг, Нью-Йорк, стр. 347–363.

Ваганов Е.А., Шиатов С.Г., Мазепа В.С. Дендроклиматические исследования в Урало -Сибирской  
Субарктике. Наука, Новосибирск, 1996. С. 246.

Ваганов Э.А., Хьюз М.К., Кирдянов А.В., Швайнгрубер Ф.Х., Силкин П.П., 1999.  
Влияние времени выпадения и таяния снега на рост деревьев в субарктической Евразии.  
*Природа* 400 (6740), 149–151. <https://doi.org/10.1038/22087>.

Ваганов, Е.А., Хьюз, М.К., Шашкин, А.В., 2006. Динамика роста годовичных колец хвойных деревьев:  
образы прошлых и будущих условий // *Экологические исследования*, т. 183.  
Springer Science & Business Media, Берлин.

Висенте-Серрано, С.М., Бегерия, С., Лопес-Морено, Дж.И., Ангуло, М., Кенави, А., 2010.  
Новый глобальный набор данных с сеткой 0,5 (1901–2006 гг.) мультишкального индекса засухи:  
сравнение с текущими наборами данных индекса засухи на основе индекса интенсивности засухи  
Палмера. *J. Hydrometeorol.* 11 (4), 1033–1043. <https://doi.org/10.1175/2010JHM1224.1>.

Уокер, XJ, Мак, МС, Джонстон, JF, 2015. Анализ стабильных изотопов углерода выявляет широко  
распространенный стресс, вызванный засухой, в boreальных лесах черной ели. *Glob. Chang.*  
*Biol.* 21, 3102–3113. <https://doi.org/10.1111/gcb.12893>.

Всемирная метеорологическая организация, 2021. <https://public.wmo.int/en/media/press-release/wmo-recognizes-new-arctic-temperature-record-of-38%E2%81%B0C> (дата обращения: 4 сентября 2023 г.).