

УДК 630*561.24

РАДИАЛЬНЫЙ РОСТ ДЕРЕВЬЕВ В АНТРОПОГЕННО ИЗМЕНЕННОМ ЛИСТВЕННИЧНИКЕ КРИОЛИТОЗОНЫ

В. Е. Бенькова¹, А. В. Бенькова¹, Д. А. Машуков¹, А. С. Прокушкин¹,
А. В. Шашкин¹, Е. А. Шашкин¹, А. В. Качаев²

¹ Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН – обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН
660036, Красноярск, Академгородок, 50/28

² Сибирский государственный университет науки и технологий им. М. Ф. Решетнева
660037, Красноярск, пр. имени газеты «Красноярский рабочий», 31

E-mail: benkova@yandex.ru, annie1977@yandex.ru, mashukov1988@gmail.com,
prokushkin@ksc.krasn.ru, shashkin@ksc.krasn.ru, onlytmp@mail.ru, avkachaev@gmail.com

Поступила в редакцию 31.03.2024 г.

Приведены результаты исследования последствия антропогенного воздействия (прокладка через северотаежный лиственничник дороги – «зимника», функционировавшей с 1984 по 2002 г.) на радиальный рост деревьев лиственницы Гмелина (*Larix gmelinii* (Rupr.) Rupr.). Выявлено, что после прокладки дороги у деревьев, растущих в пределах антропогенно измененного участка, радиальный прирост резко возрос и достиг пиковых значений – 0.971–1.601 мм, в то время как в естественном древостое остался равным 0.121 ± 0.003 мм. Измерения показали, что в конце августа сезонно-талый слой (СТС) на дороге и бровке (119.1 ± 18.4 и 71.9 ± 6.8 см) существенно превышает таковой в естественном древостое (54.8 ± 5.8 см), т. е. на антропогенно измененном участке температура СТС в течение сезона возрастает быстрее и принимает более высокие значения. По скользящим климатическим функциям отклика индексов радиального прироста выявлено, что антропогенное воздействие модифицировало реакцию деревьев на влияние климатических факторов. Это выразилось в более ранней, по сравнению с естественным древостоем, реакции деревьев на весенне-раннелетние температуры воздуха, что свидетельствует о более раннем начале роста годичного кольца, а также в более продолжительной (конец мая – конец июня) по сравнению с контролем (конец мая – начало июня) реакции деревьев вблизи дороги на количество осадков. Сделано заключение, что модификация климатического сигнала и резкое увеличение радиального прироста обусловлены улучшением гидротермических условий на антропогенно измененном участке. Выявлено, что после прекращения эксплуатации дороги в 2002 г. гидротермические почвенные условия и радиальный прирост деревьев на антропогенно измененном участке леса «вернутся» к фоновому состоянию примерно через 30 лет, что сходно с постпирогенным восстановлением. Учет долговременных эффектов улучшения гидротермических свойств сезонно-талого слоя, уменьшения толщины органического слоя и формирование увеличенных радиальных приростов на антропогенно измененном участке древостоя может повысить точность оценок баланса углерода в лесных экосистемах криолитозоны.

Ключевые слова: радиальный прирост, лиственница Гмелина, антропогенное воздействие, гидротермические почвенные условия, климатические факторы.

DOI: 10.15372/SJFS20240504

ВВЕДЕНИЕ

Текущее потепление климата, наиболее выраженное в последний полувек, привело к изменениям состояния лесов криолитозоны, связанным в значительной степени

с деградацией многолетней мерзлоты (Шиятов, 2009; Конищев, 2011; Николаев и др., 2011; Nikolaev et al., 2011; и др.). На лесные экосистемы в последнее время усиливается также и антропогенное влияние, связанное с интенсивным освоением северных территорий (прокладка

дорог, геологические изыскания и добыча полезных ископаемых, нефти и природного газа, лесозаготовки, строительство объектов и др.), которое может существенно модифицировать климатический эффект (Li et al., 2023). В связи с актуальностью вопросы «локальной адаптации» деревьев в лесах криолитозоны к изменению климата и сопутствующих условий произрастания, а также к антропогенной нагрузке были включены в перечень приоритетных направлений фундаментальных исследований РФ на 2021–2030 гг. Многочисленные исследования посвящены дендрэкологическим и физиологическим аспектам роста деревьев на многолетнемерзлых почвах (Гамалей, 2011; Бенькова и др., 2012; Брюханова и др., 2013; Bryukhanova et al., 2013; Машуков и др., 2020; Churakova-Sidorova et al., 2020; и др.). Работы по антропогенному влиянию на рост северных лесов не столь многочисленны. Большая часть их посвящена исследованию воздействию пожаров (Knorr et al., 2022 и др.) и промышленных загрязнений (Арсеньева, Чавчавадзе, 2001; Черненко и др., 2012; Кирдянов и др., 2014; Kirdyanov et al., 2014; 2024; Kharuk et al., 2023; и др.).

Цель настоящей работы – выявление изменений радиального роста деревьев лиственницы Гмелина (*Larix gmelinii* (Rupr.) Rupr.), возникших при антропогенном нарушении в лиственничнике, произрастающем на многолетнемерзлой почве, в связи с прокладкой через него дороги сезонного назначения («зимника»).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Район исследований находится на территории Нижне-Тунгусского округа лиственничных и лиственнично-темнохвойных северотаежных лесов Среднесибирской лесорастительной области и располагается в центральной части плато Сыверма, в районе слияния рек Кочечум и Нижняя Тунгуска (рис. 1, а). Климат района семигумидный, резко континентальный (Прокушкин и др., 2008). Средняя температура января -36.0°C , июля 16.8°C , среднегодовая температура -8.8°C , среднегодовое количество осадков 364 мм, причем более половины из них приходится на летние месяцы (характеристики рассчитаны за период 1935–2016 гг. по данным метеостанции «Тура», ближайшей к району исследования (ВНИИГМИ-МЦД, 2024)).

Безморозный период длится 100 дней, период без заморозков на почве – 53–56 дней (цит.

по: Прокушкин и др., 2008). Вегетационный сезон составляет 70–90 дней (Буторина, 1979). Рост годовичного кольца деревьев лиственницы фактически прекращается к середине августа (Брюханова и др., 2013; Bryukhanova et al., 2013). Интенсивное потепление климата в районе исследования со второй половины 90-х годов XX в. демонстрируют положительные тренды температур мая, июня, июля по данным метеостанции «Тура» (Бенькова и др., 2015; Kirdyanov et al., 2024).

Почвы – криогидроморфные криоземы гомогенные. Верхний 20-сантиметровый слой имеет положительные температуры примерно 4 мес в году (Ершов, 1994; Прокушкин, 2008). Измерения температуры почвы, проводимые А. С. Прокушкиным и сотрудниками лаборатории биогеохимических циклов в лесных экосистемах Института леса СО РАН (ИЛ СО РАН) в непрерывном режиме в лиственничнике на склоне северной экспозиции, произрастающем в 18 км от нашего места исследования, показали, что в 2004 г. положительные температуры под моховым покровом держались 3.5 мес, с 10 июня до 26 сентября, при этом в середине июля их максимальные значения не превышали 8°C , на глубине 10 см – 4.5°C и на глубине 20 см – 3.5°C (Машуков и др., 2020). Снежный покров толщиной 40–50 см сохраняется до 207 дней (Ершов, 1994; Прокушкин, 2008; и др.). Лесная растительность занимает 80 % территории. Лиственница Гмелина формирует преимущественно монодоминантные древостои (Абаимов и др., 1997).

Исследования проводились в бассейне р. Нижняя Тунгуска, в среднем ее течении, на базе Эвенкийского опорного экспедиционного пункта ИЛ СО РАН (Эвенкийский муниципальный район Красноярского края). Для этого был выбран лиственничник багульниково-брусничный зеленомошный (10Л) послепожарного возобновления возрастом 120 лет (Kirdyanov et al., 2024), произрастающий на склоне северной экспозиции с уклоном около 2° и характеризующийся V классом бонитета.

В 1984 г. однородность лиственничника была нарушена прокладкой через него дороги сезонного назначения – «зимника». Ее современный вид представлен на рис. 1, б. Во время полевых работ в 2017 г. было замечено, что деревья вблизи дороги – более крупные по сравнению с таковыми в глубине леса (рис. 2).

В частности, средний по 10 здоровым деревьям диаметр на высоте груди у деревьев в глубине леса был равен 6.5 ± 2.5 см, а сред-



Рис. 1. Расположение района исследования в бассейне р. Нижняя Тунгуска (а) и пробных площадок (б) в глубине леса (ЛЕ) и на антропогенно измененных участках (КР 0, КР 1, КР 2).

ДО – участок дороги, эксплуатировавшийся до 2002 г.

ная высота – 5.9 ± 1.5 м. У деревьев, произрастающих в 10 м от бровки дороги, эти показатели были в 1.4–1.5 раз больше: 8.5 ± 1.5 см и 9.1 ± 1.3 м соответственно. Предположительно этот эффект возник в связи с улучшением условий роста, главным образом почвенных условий, на антропогенно измененном участке. Действительно, прокладывание временных дорог в криолитозоне, как отмечал С. А. Игловский (2013), приводит к локальному нарушению растительного покрова, изменениям верхних горизонтов почвы и микрорельефа, развитию эрозионных

и термокарстовых процессов; на нарушенных участках почва имеет более высокую температуру и большую глубину сезонно-талого слоя (СТС). Для выявления этих тенденций на наших объектах исследования были проведены трехразовые (в середине июня, июля и августа) измерения толщины сезонно-талого слоя в течение сезона 2017 г. на антропогенно измененном и естественном участках леса.

Для оценки влияния зимней дороги на рост деревьев в 2017 г. выделили участок дороги, который использовался до 2002 г. На нем были



Рис. 2. Участки лиственничника вблизи дороги на пп КР 1 (а) и в глубине леса на пп ЛЕ (б).

заложены пробные площадки (пп) с разной степенью воздействия: пп КР 0 – непосредственно на левой борровке, пп КР 1 и КР 2 – на расстоянии 10 и 40 м от правого края. В глубине леса, на расстоянии 100 м от дороги, заложили контрольную пп ЛЕ. Примечательно, что на пп ЛЕ отмечены суховершинные деревья, чего не наблюдалось на других пп. На рис. 2 представлены участки лиственничника на пп КР 1 (а) и пп ЛЕ (б).

Образцы для анализа (спилы несуховершинных деревьев) были отобраны в 2017 г. на высоте ствола 1.3 м в числе 25 шт. на пп ЛЕ (контроль), 10 шт. на пп КР 0, 22 – на пп КР 1, 10 – на пп КР 2. Ширину годичных колец (ШГК) определяли по двум радиусам на измерительных системах LINTAB v3.0 и LINTAB v5.0 с точностью 0.01 мм, перекрестное датирование полученных отдельных серий проводили с помощью TSAP-Win.TSAP v3.5. Датировку статистически верифицировали программой COFECNA.

Серии ШГК стандартизировали (индексировали) с использованием программного обеспечения ARSTAN (1995) (Holmes, 1983). На пп ЛЕ стандартизация (удаление из индивидуальных серий убывающего тренда) проводили отрицательной экспоненциальной функцией в период 1935–2016 гг. На пп КР 0, КР 1, КР 2 в связи со сложным характером динамики ШГК индексирование проводилось двумя функциями: отрицательной экспоненциальной функцией в 1935–1984 гг., которая нивелировала возрастную тренд, и «сглаживающей сплайн-функцией» в 1985–2016 гг., которая сглаживала колоколообразную форму на кривых в зависимостях ШГК.

Для выделения периодов времени в пределах сезона вегетации со значимым влиянием климатических факторов на радиальный рост лиственницы использовали метод расчета и анализа скользящих корреляционных климатических функций отклика. Рассчитывалась корреляция индексов ширины годичных колец с сериями скользящих с «окном» в 20 дней и «шагом» в 5 дней среднесуточных температур и суточных осадков. Ранее было показано, что такая длительность «окна» и «шага» оптимальна для мест с коротким сезоном роста (Симанько и др., 2013). Расчеты проводились с 10 апреля по 10 сентября, когда климатические факторы текущего сезона могут заметно повлиять на рост годичного кольца.

Чтобы выяснить, модифицирует ли антропогенный фактор климатический отклик радиального прироста, скользящие функции отклика рассчитывали отдельно для двух периодов вре-

мени – 1935–1984 и 1985–2016 гг., т. е. до прокладки дороги и после.

При построении функций отклика использовали суточные климатические данные (температуру воздуха и количество осадков) по метеостанции «Тура», за период 1935–2016 гг. (ВНИИГМИ-МЦД, 2024)

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Индивидуальные серии ширины годичных колец всех деревьев в пределах каждой пп в 1906–1984 гг. тесно коррелируют между собой: межсерийные коэффициенты корреляции варьируют в пределах 0.88–0.91 при $p \leq 0.05$. Это дает основание для построения обобщенной древесно-кольцевой хронологии, отражающей особенности роста всех деревьев на каждой пп.

Средние кривые хода роста, построенные для пробных площадок (рис. 3, а, б) имеют одинаковые особенности: первый максимум ШГК совпадает с границей между ювенильной и взрослой древесиной (Schweingruber, 1996), затем, до начала 1950-х годов, ШГК экспоненциально убывает и позже – стабилизируется. На контрольной пп ЛЕ деревья имели стабильный радиальный прирост до 2016 г. (т. е. до года сбора образцов), а на антропогенно измененном участке – до 1984 г. (т. е. до года прокладки дороги; рис. 3, б).

Усредненные по деревьям ходы роста на пп с разной степенью антропогенного влияния (КР 0, КР 1, КР 2) и контроле (пп ЛЕ) тесно коррелируют между собой в 1906–1984 гг. (коэффициенты парной корреляции $R = 0.71–0.87$ при $p \leq 0.05$). Средние значения ШГК за 1935–1984 гг. у деревьев на пп КР 0, КР 1, КР 2 достоверно не различались, но были несколько меньше, чем на пп ЛЕ (табл. 1).

После прокладки дороги в 1984 г. ШГК деревьев на антропогенно-измененных пп (рис. 3, б) резко возросла. Так, на пп КР 2 ее резкое увеличение началось в 1985 г., т. е. в следующем после прокладки дороги, на пп КР 1 – в 1993 г., т. е. через 9 лет, и на пп КР 0 – в 2001 г., через 17 лет после прокладки дороги. Различия в датах обусловлено тем, что правый край дороги подвергался эрозии от воздействия талых вод, из-за чего дорога постепенно сдвигалась влево (рис. 1, б), при этом менялись (улучшались) условия роста деревьев, оказавшихся у вновь образованной левой борровки.

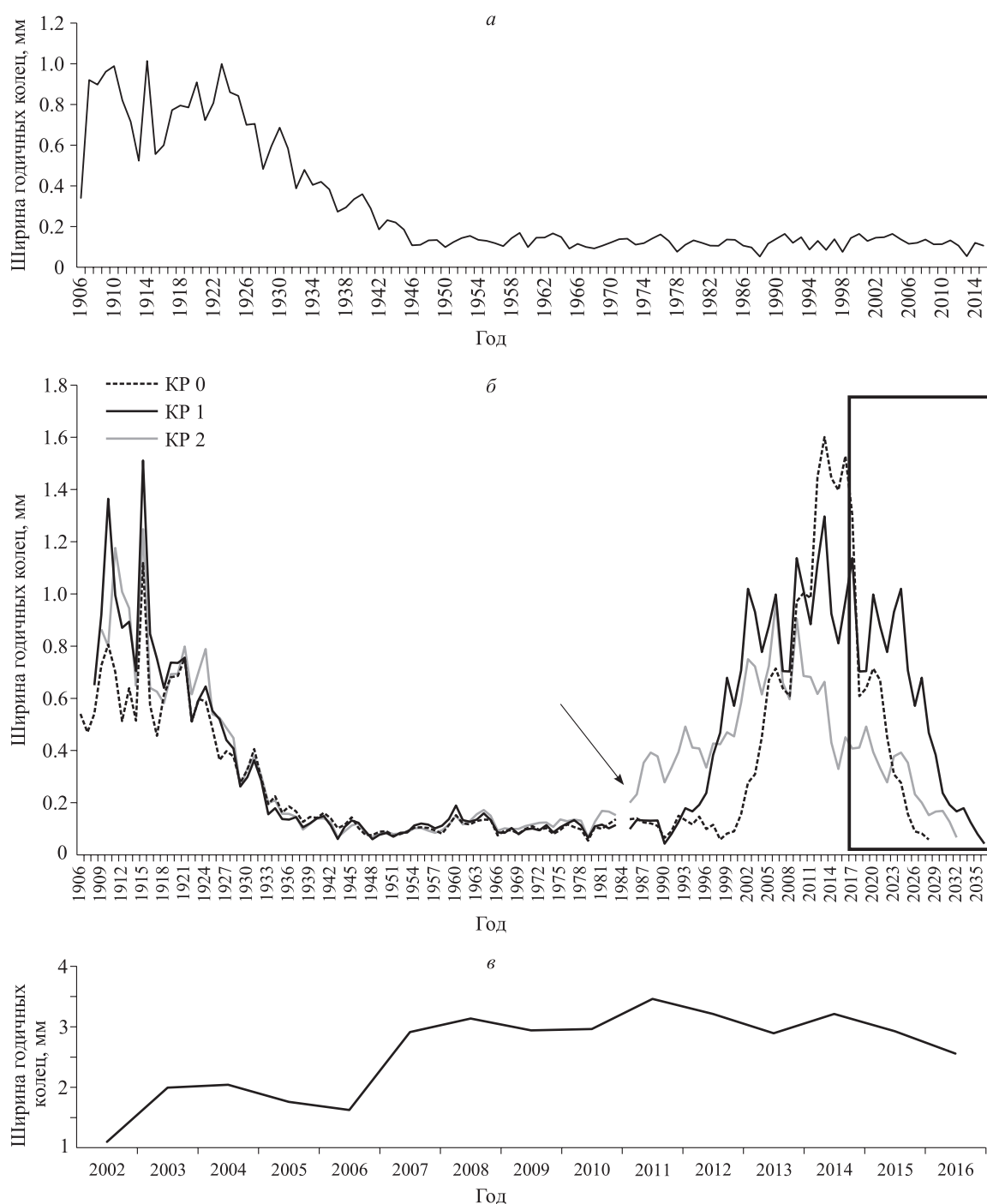


Рис. 3. Ход роста ширины годичных колец (ШГК) с течением времени у деревьев лиственницы Гмелина на пробных площадках.

a – пп ЛЕ; *б* – в глубине леса, на антропогенно измененном участке: пп КР 1, КР 2, КР 0; *в* – в среднем по 10 молодым 30–40-летним деревьям на краю дороги. Значения ШГК после 2016 г. (выделенная прямоугольником справа область на рис. б) получены при экстраполяции колоколообразного участка квадратичной функции. Стрелкой обозначен год прокладки дороги (1984).

Таблица 1. Средняя ширина годичных колец ($\pm$ ошибка среднего) деревьев лиственницы на пробных площадках до и после прокладки дороги, мм

Период	КР 0	КР 1	КР 2	ЛЕ
До прокладки дороги (1935–1984 гг.)	0.110 ± 0.004	0.110 ± 0.003	0.117 ± 0.003	0.161 ± 0.001
После прокладки дороги (1984–2016 гг.)	0.536 ± 0.006	0.597 ± 0.004	0.521 ± 0.002	0.121 ± 0.003

Таблица 2. Статистические характеристики индексированных древесно-кольцевых хронологий

Показатель	КР 0	КР 1	КР 2	ЛЕ
Длительность хронологии с 1935 г.	81	81	81	81
Средний коэффициент чувствительности	0.21	0.22	0.18	0.22
Средний Rbar	0.64	0.62	0.61	0.68
EPS	0.91	0.93	0.93	0.95
Стандартное отклонение	0.35	0.36	0.28	0.28

После последней расчистки (2001 г.) сформировалась бровка дороги, где в 2017 г. нами была заложена пп КР 0. Через определенное время (рис. 3, б), характеризующееся стабильным ростом, ШГК достигла пиковых значений: на пп КР 2 в 2006 г. – 0.971 ± 0.003 мм, на пп КР 1 и КР 0 в 2013 г. – 1.297 ± 0.003 и 1.601 ± 0.004 мм соответственно. Затем наметилась тенденция к уменьшению ШГК. Как следствие на кривых хода роста обозначился колоколообразный участок (рис. 3, б). Средние значения ШГК за 1985–2016 гг. на антропогенно измененных пп оказались в 4–5 раз больше, чем на пп ЛЕ в естественном древостое и во столько же раз больше, чем на тех же пп за предыдущий период (1935–1984 гг.) (табл. 1).

Как было отмечено в предыдущем разделе, зависимости ШГК от времени в промежутке 1935–2016 гг. (в дендрохронологии – абсолютные древесно-кольцевые хронологии) на контрольной пп стандартизировали (индексировали) отрицательной экспоненциальной функцией, а на антропогенно измененном участке – с использованием двух функций: отрицательной экспоненциальной в 1935–1984 гг. и «сглаживающей сплайн-функцией» в 1985–2016 гг. Статистические характеристики индексированных древесно-кольцевых хронологий радиального прироста приведены в табл. 2.

Коэффициент чувствительности характеризует относительную погодичную изменчивость индексов прироста в индивидуальных индексированных хронологиях. По критерию С. Г. Шиятова с соавт. (2000), если коэффициент чувствительности больше 0.20, то индексированную хронологию можно использовать в дальнейшем анализе влияния климатических факторов на радиальный прирост. Коэффициент Rbar характеризует межсерийную корреляцию индивидуальных индексированных хронологий в пределах пп. Значение коэффициента EPS (expressed population signal) показывает, в какой степени реальная хронология на пп «отражает гипотетическую, представленную бесконечным количеством деревьев. При значениях

$EPS \geq 0.85$ хронология считается достаточно представительной» (Briffa, Jones, 1990).

Индексированные хронологии КР 0, КР 1 и ЛЕ характеризуются коэффициентом чувствительности, большим 0.20, т. е. их, по критерию С. Г. Шиятова с соавт. (2000), можно использовать в дальнейшем анализе влияния климатических факторов на радиальный прирост. Исключение составляет хронология КР 2 с коэффициентом чувствительности 0.18. В то же время, довольно высокая межсерийная корреляция ($Rbar = 0.61$) и выраженный популяционный сигнал ($EPS = 0.93$) свидетельствуют о том, что и эту хронологию, так же, как и остальные, можно использовать для дальнейшего анализа.

Судя по значениям коэффициента Rbar, серии индексированных ШГК деревьев в пределах каждой пробной площадки довольно хорошо коррелируют между собой, т. е. динамику их радиального роста хорошо описывает усредненная индексная кривая. Средние индексированные древесно-кольцевые хронологии радиального прироста представлены на рис. 4.

Для того чтобы ответить на вопрос, скажется ли антропогенное воздействие на климатическом отклике деревьев, мы построили скользящие корреляционные функции отклика индексов радиального прироста на температуру воздуха и количество осадков для двух временных периодов: до прокладки дороги (1935–1984 гг.) и после (1985–2016 гг.). Коэффициенты корреляции $-0.29 \geq R \geq 0.29$ в первый период и $-0.37 \geq R \geq 0.37$ во второй значимы при $p \leq 0.05$ для всех хронологий. На скользящих функциях отклика индексов радиального прироста выделяются периоды сезона роста со значимым влиянием климатических факторов на ширину годичных колец (рис. 5).

Первый временной период (1935–1984 гг.). На пп ЛЕ и КР 0 во второй декаде августа индексы радиального прироста положительно коррелируют с температурами воздуха ($p \leq 0.05$). На всех остальных пп значимой корреляции с температурой воздуха не выявлено (рис. 5, а).

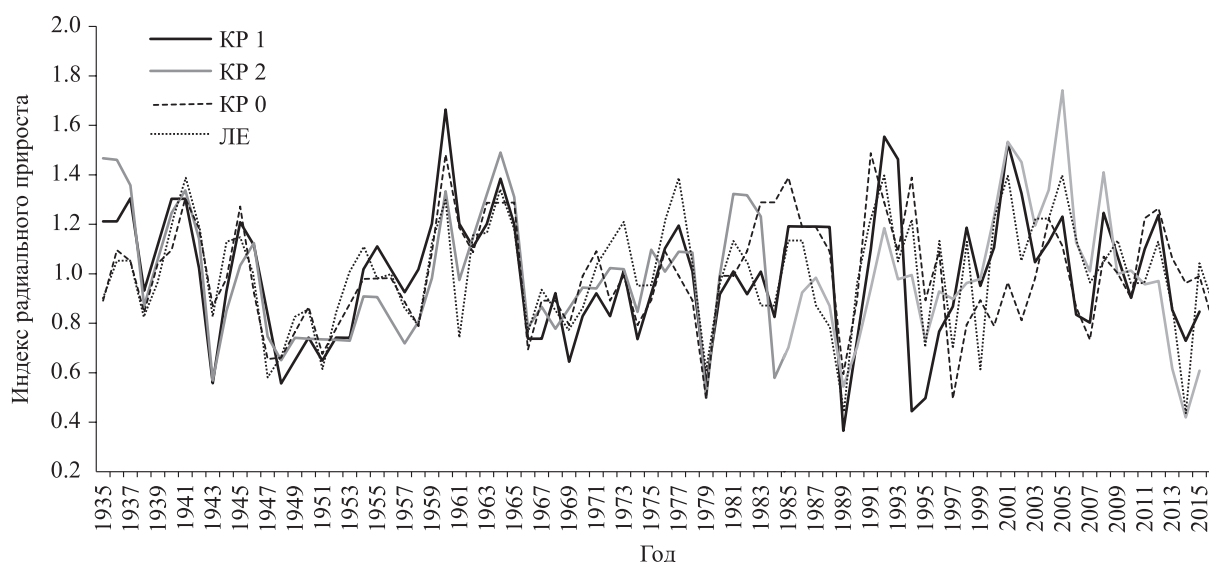


Рис. 4. Индексированные древесно-кольцевые хронологии радиального прироста лиственницы.

Корреляция индексов радиального прироста деревьев с количеством осадков незначима на всех пп (рис. 5) при $p \leq 0.05$.

Второй временной период (1985–2016 гг.). Функции отклика существенно отличаются более тесной корреляционной связью индексов радиального прироста с климатическими факторами по сравнению с предыдущим периодом.

На пп КР 1, КР 2 и ЛЕ во второй половине апреля индексы радиального прироста отрицательно коррелируют с температурами воздуха ($p \leq 0.05$; рис. 5, а).

Выявлена положительная связь индексов прироста с температурой на пп КР 0 – в начале мая, на пп КР 1 – со второй декады мая до конца первой половины июня, на пп КР 2 – в середине июня, на пп ЛЕ – с конца мая до конца июня.

Значимая положительная корреляция индексов прироста с количеством осадков (рис. 5, б) выявлена на пп КР 1 (конец мая – конец июня), КР 2 (конец мая – начало июня и конец июня) и на пп ЛЕ в конце мая.

Во второй-третьей декаде августа индексы прироста на КР 0 отрицательно коррелируют с температурами воздуха.

После прокладки дороги деревья лиственницы на антропогенно-измененном участке существенно повысили скорость радиального роста, чего не произошло в естественном древостое, поскольку и те и другие произрастают в одинаковых климатических условиях, можно утверждать, что резкий рост продуктивности не связан с потеплением климата. При прокладке и эксплуатации дороги нарушается термоизолирующий мохово-лишайниковый покров, в связи с

чем гидротермические условия на участке дороги ДО и вблизи него улучшаются. Действительно, данные прямых измерений в 2017 г. показали (рис. 6, а), что уже к середине июня глубина оттаивания сезонно-талого слоя (СТС $\pm$ стандартное отклонение) на дороге становится почти в 2 раза больше, чем на контроле (32.9 ± 6.6 и 17.3 ± 2.3 см), в то время как между контролем и бровкой не проявляется заметного различия по этому показателю.

Через месяц толщина СТС на дороге становится более чем в 3 раза больше, чем на контроле (103 ± 12.3 и 32.6 ± 5.6 см соответственно); существенная разница в 2.2 раза между этими показателями сохраняется до конца августа. На бровке к середине июля среднее значение СТС становится на 11.2 см, а к концу августа – на 17.1 см больше, чем на контроле, т. е. непосредственно на дороге и вблизи нее почвы прогреваются быстрее и в течение сезона имеют более высокие температуры, чем в естественном древостое.

Толщина органогенного слоя на дороге очень мала, примерно в 10 раз меньше, чем на бровке и в контроле, и эта разница сохраняется в течение сезона. Контроль и бровка дороги по этому показателю слабо различаются в середине июня (17.3 ± 2.3 и 18.7 ± 3.3 см), однако к середине июля и до конца августа на бровке дороги он (показатель) становится достоверно меньше, чем на дороге (на 3.8 и 2.5 см соответственно). Таким образом, повышенный радиальный прирост деревьев на антропогенно измененном участке относительно контроля не связан с улучшением питательных свойств почвы.

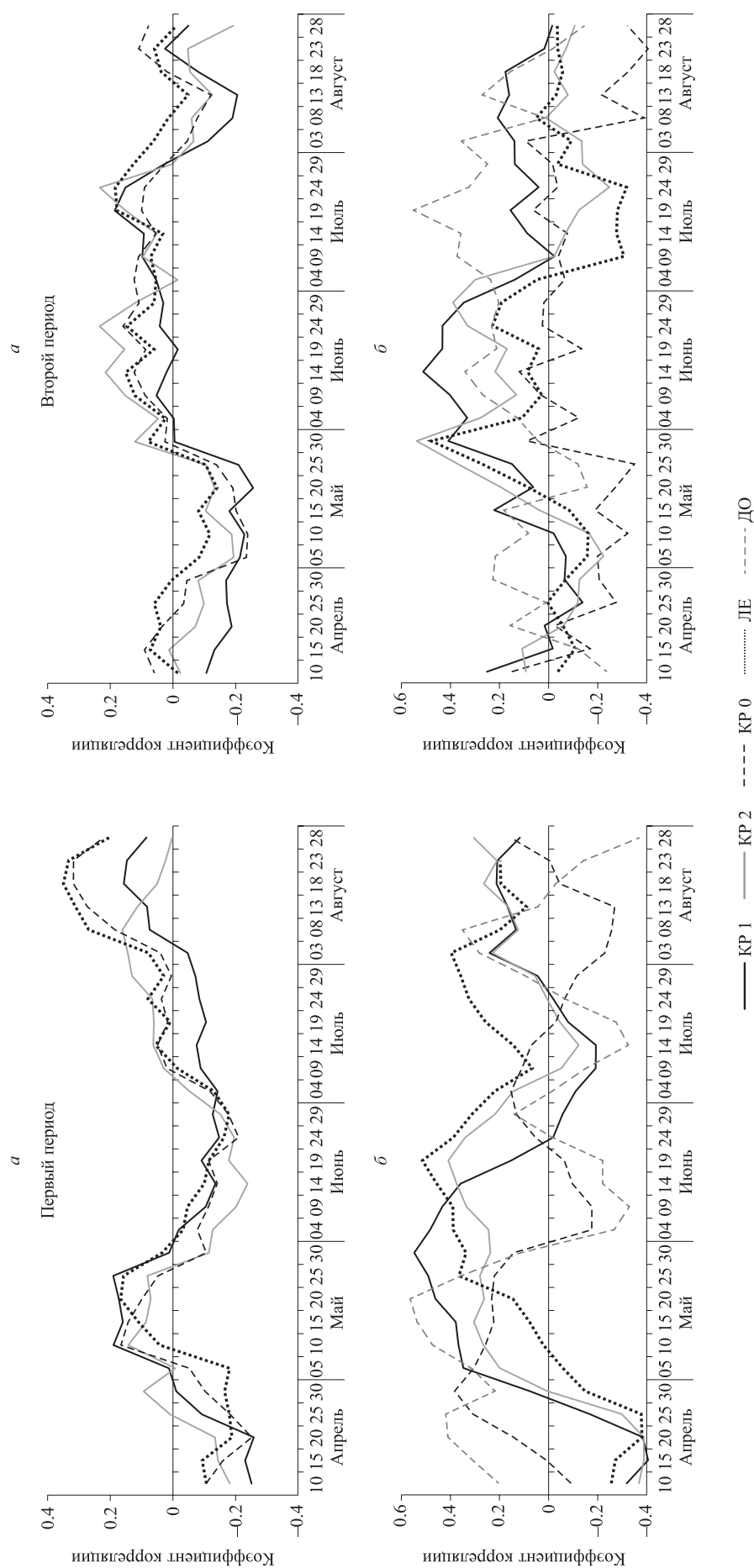


Рис. 5. Скользящие корреляционные функции отклика индексов радиального прироста деревьев, произрастающих на контроле (ЛЕ) и антропогенно измененных пробных площадках вблизи дороги (KR 0, KR 1 и KR 2), на температуру воздуха (а) и осадки (б).
Значимые коэффициенты корреляции: первый период $-0.29 \geq R \geq 0.29$, второй $-0.37 \geq R \geq 0.37$.

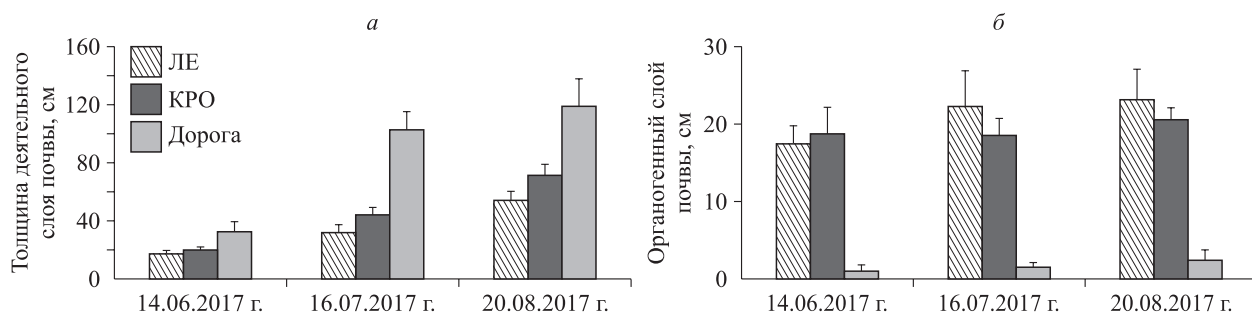


Рис. 6. Толщина сезонно-талого (а) и органогенного (б) слоев на участке дороги ДО, у бровки дороги на пп КР 0 и в глубине леса на пп ЛЕ в сезон 2017 г.

Данные, приведенные на рис. 6, показывают, что даже через 15 лет после прекращения эксплуатации термические условия на опытном участке дороги и вблизи нее – более благоприятные для роста растительности по сравнению с контрольным участком леса.

Как отмечалось выше, после достижения пиковых значений наметилась тенденция постепенного уменьшения ширины годовых колец (см. рис. 3, б). Последнее связано с тем, что после прекращения эксплуатации дороги на исследуемом участке (2002 г.) восстанавливается термоизолирующий мохово-лишайниковый покров, и гидродинамические свойства почвы постепенно «возвращаются» к фоновому состоянию. Чтобы выявить, через сколько лет это произойдет, мы экстраполировали правую ветвь колоколообразных участков на кривых хода роста на последующий за 2016 г. период времени (см. рис. 3, б, область выделена прямоугольником). Для экстраполяции использовали квадратичную функцию, которая хорошо описывает этот участок кривой ($R > 0.86$ при $p \leq 0.01$). Мы выяснили, что после прекращения эксплуатации дороги гидротермические почвенные условия и соответственно радиальный прирост деревьев на антропогенно измененном участке леса «вернутся» к фоновому состоянию через 30 ± 4 года. Примерно такое же время требуется для постпирогенного восстановления состояния криогенных лесных почв и радиальных приростов лиственницы (Knorre et al., 2022; и др.).

Для выявления эффекта потепления климата на радиальный прирост мы сравнивали периоды 1935–1984 гг. и 1985–2016 гг. по климатическому отклику индексов радиального прироста на каждой пп. Более выраженную реакцию деревьев на погодные условия как в антропогенно измененном, так и естественном участках леса в 1985–2016 гг. по сравнению с предыдущим периодом мы связываем с текущим потеплением

климата. Возросло влияние апрельских температур воздуха на формирование годовичного прироста. Ранее было установлено, что сезон радиального роста деревьев лиственницы Гмелина в 18 км от наших пп начинается в первых числах июня и заканчивается, как правило, к середине августа (Yasue et al., 2010; Брюханова и др., 2013; Bryukhanova et al., 2013). В предшествующий период происходит предсезонная реактивация камбия, которая может длиться до 2 мес (Prislan et al., 2011). Теплый апрель «провоцирует» раннее начало этого процесса. Последующие за оттепелью заморозки, типичные для данной местности, могут затормозить или вообще остановить процесс реактивации, что негативно скажется на ширине годовичного кольца. В связи с тем, что в последние десятилетия май-июньский период стал более теплым (Бенькова и др., 2015; Кирдянов и др., 2014; Kirdyanov et al., 2014, 2024), усилилось положительное влияние температуры на ширину годовичного кольца в этот период времени, т. е. в начале и во время интенсивного роста. В то же время снизилось влияние августовских температур на радиальный прирост.

В результате сравнительного анализа климатического отклика индексов радиального прироста на антропогенно измененном участке и на контроле в период 1985–2016 гг. мы выявили, что рассмотренное в работе антропогенное воздействие модифицирует реакцию деревьев на влияние климатических факторов. Это выражается в более ранней по сравнению с контролем реакции деревьев на антропогенно измененном участке на майские и июньские температуры воздуха, что в совокупности с данными по сезонной динамике толщины СТС может свидетельствовать о более раннем начале роста годовичного кольца, а также в более продолжительной (конец мая – конец июня) по сравнению с контролем (конец мая – начало июня) реакции деревьев,

произрастающих вблизи дороги, на количество осадков, что свидетельствует о более жестком дефиците доступной влаги. Осадки используются деревьями как основной источник воды, восполняющий дефицит влаги в начале сезона роста, когда поверхностный слой почвы еще не оттаял. В то же время деревья, произрастающие на самой бровке, не реагируют на количество осадков в этот период сезона. Их потребность в воде обеспечивается потоками талой воды вдоль дороги, поверхность которой прогревается быстрее и имеет более высокую температуру.

Из сказанного выше можно заключить, что основной причиной модификации климатического отклика у деревьев на антропогенно измененном участке леса являются лучшие, чем на контроле, гидротермические условия роста.

Возможно, что на антропогенно измененном участке древостоя могут сформироваться такие условия роста, при которых эффекты «весенне-летнего потепления» и антропогенного воздействия могут усилить друг друга. Косвенным подтверждением этому служит сравнительно высокая скорость радиального роста молодых 30–40-летних деревьев, начавших свой рост в более теплых климатических условиях на расчищенном участке по левому краю дороги (см. рис. 3). Их средний прирост в ювенильной древесине, сформированной в 2001–2016 гг. на высоте ствола 1.3 м, почти в 3 раза больше, чем таковой в ювенильной древесине сравнительно старых деревьев, сформированной в 1906–1926 гг. (см. рис. 3, а, в).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

После прокладки дороги сезонного назначения («зимника») через лиственничник послепожарного возобновления на прилегающем к дороге участке леса резко улучшились гидротермические свойства многолетнемерзлых почв. Увеличилась глубина сезонного оттаивания. Это значит, что температура сезонно-талого слоя на этом участке стала возрастать быстрее и принимать более высокие значения, чем в естественном древостое. Как результат резко возросли радиальный прирост и чувствительность его к влиянию климатических факторов. Реакция годовичного кольца на погодные условия стала проявляться в более ранние сроки весенне-ранне-летнего периода сезона, что в совокупности с улучшением гидротермических почвенных условий может свидетельствовать о более раннем начале сезона роста на антропогенно изме-

ненном участке по сравнению с естественным участком леса.

После прекращения эксплуатации дороги гидротермические почвенные условия и соответственно радиальный прирост деревьев на антропогенно измененном участке леса «вернутся» к фоновому состоянию примерно через 30 лет. Такое же время требуется для постпирогенного восстановления состояния криогенных лесных почв и радиальных приростов лиственницы.

Учет долговременных эффектов улучшения гидротермических свойств сезонно-талого слоя, уменьшения толщины органического слоя и формирования увеличенных радиальных приростов на антропогенно измененном участке древостоя может повысить точность оценок баланса углерода в лесных экосистемах криолитозоны.

Работа выполнена по государственному заданию по базовому проекту ИЛ СО РАН «Динамика компонентов углеродного цикла экосистем Сибири в меняющемся климате» (2024–2026 гг.). FWES-2024-0023.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Абаимов А. П., Прокушкин С. Г., Зырянова О. А., Каверзина Л. Н. Особенности формирования и функционирования лиственничных лесов на мерзлотных почвах // Лесоведение. 1997. № 5. С. 13–23.
- Арсеньева, Т. В., Чавчавадзе Е. С. Эколого-анатомические аспекты изменчивости древесины сосновых из промышленных районов Европейского Севера. СПб.: Наука, 2001. 109 с.
- Бенькова В. Е., Шашкин А. В., Наурзбаев М. М., Прокушкин А. С., Симанько В. В. Значение микроэкологических условий для роста лиственницы Гмелина в экотоне верхней границы леса на полуострове Таймыр // Лесоведение. 2012. № 5. С. 59–70.
- Бенькова А. В., Мацуков Д. А., Бенькова В. Е., Прокушкин А. С., Шашкин А. В. Значение экспозиции склонов для роста лиственницы Гмелина в мерзлотных условиях Средней Сибири. I. Различия в динамике радиального прироста деревьев на склонах северной и южной экспозиции // Сиб. лесн. журн. 2015. № 4. С. 18–29.
- Брюханова М. В., Кирдянов А. В., Прокушкин А. С., Силкин П. П. Особенности ксилогенеза *Larix gmelinii* (Rupr.) Rupr. в условиях криолитозоны Средней Сибири // Экология. 2013. № 5. С. 323–329.
- Буторина Т. Н. Биоклиматическое районирование Красноярского края // Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1979. 231 с.
- ВНИИГМИ-МЦД (Всероссийский НИИ гидрометеорологической информации – Мировой центр данных. Обнинск, 2024. <http://mete.ru>
- Гамалей Ю. В. Криофиты Евразии: происхождение и структурно-функциональная специфика // Бот. журн. 2011. Т. 96. № 12. С. 1521–1546.

- Ершов Ю. И. Мезоморфное почвообразование в таежно-мерзлотном семигумидном секторе Средней Сибири // Почвоведение. 1994. № 10. С. 10–18.
- Игловский С. А. Антропогенная трансформация мерзлотных условий Европейского Севера России и ее последствия // Арктика и Север. 2013. № 10. С. 107–124.
- Кирдянов А. В., Мыглан В. С., Пименов А. В., Кнорре А. А., Экарт А. К., Ваганов Е. А. Динамика усыхания лиственницы сибирской в зоне влияния техногенных эмиссий предприятий Норильского промышленного района // Сиб. экол. журн. 2014. № 6. С. 945–952.
- Конищев В. Н. Реакция вечной мерзлоты на потепление климата // Криосфера Земли. 2011. Т. 15. № 4. С. 15–18.
- Машуков Д. А., Бенькова А. В., Бенькова В. Е., Шашкин А. В., Прокушкин А. С. Радиальный прирост и анатомическая структура древесины стволов здоровых и суховершинных деревьев лиственницы на многолетней мерзлоте // Лесоведение. 2020. № 6. С. 1–10.
- Николаев А. Н., Федоров П. П., Десяткин А. Р. Влияние гидродинамического режима мерзлотных почв на радиальный прирост лиственницы и сосны в центральной Якутии // Сиб. экол. журн. 2011. Т. 18. № 2. С. 189–201.
- Прокушкин С. Г. Структурно-функциональные особенности лиственницы Гмелина в криолитозоне Центральной Эвенкии. Красноярск: Ин-т леса им. В. Н. Сукачева СО РАН, 2008. 161 с.
- Симанько В. В., Бенькова А. В., Шашкин А. В. Применение метода «скользящих функций отклика» для выявления влияния климатических факторов на радиальный рост деревьев // Вестн. КрасГАУ. 2013. № 7. С. 188–194.
- Шиятов С. Г. Динамика древесной и кустарниковой растительности в горах Полярного Урала под влиянием современных изменений климата. Екатеринбург: УрО РАН, 2009. 216 с.
- Шиятов С. Г., Ваганов Е. А., Кирдянов А. В., Круглов В. Б., Мазепа В. С., Наурызбаев М. М., Хантемиров Р. М. Методы дендрохронологии. Ч. I. Основы дендрохронологии. Сбор и получение древесно-кольцевой информации. Красноярск: КГУ, 2000. 80 с.
- Черненко Т. В., Бочкарев Ю. Н., Фридрих М., Беттгер Т. Воздействие природно-антропогенных факторов на радиальный прирост деревьев Кольского Севера // Лесоведение. 2012. № 4. С. 3–15.
- ARSTAN. Chronology development with statistical analysis. Version 1.26V 09: 14 Mon 01 May 1995. <https://sheppard.ltr.arizona.edu/DISC2019/arstan.txt>
- Briffa K. R., Jones P. D. Measuring the statistical quality of a chronology In: Methods of dendrochronology. Applications in the environmental sciences / E. R. Cook and L. A. Kairiukstis (Eds.). Springer Dordrecht, 1990. P. 137–152.
- Bryukhanova M. V., Kirdyanov A. V., Prokushkin A. S., Silkin P. P. Specific features of xylogenesis in Dahurian larch, *Larix gmelinii* (Rupr.) Rupr., growing on permafrost soils in middle Siberia // Rus. J. Ecol. 2013. V. 44. N. 5. P. 361–366 (Original Rus. Text © M. V. Bryukhanova, A. V. Kirdyanov, A. S. Prokushkin, P. P. Silkin, 2013, publ. in Ekologiya. 2013. N. 5. P. 323–329).
- Churakova-Sidorova O. V., Lienert S., Timofeeva G., Siegwolf R., Roden J., Joos F., Saurer M. Measured and modelled source water $\delta^{18}\text{O}$ based on tree-ring cellulose of larch and pine trees from the permafrost zone // iForest – Biogeosci. & For. 2020. V. 13. Iss. 3. P. 224–229.
- Holmes R. L. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement // Tree-Ring Bull. 1983. V. 43. P. 69–75.
- Kharuk V. I., Petrov I. A., Im S. T., Golyukov A. S., Dvinskaya M. L., Shushpanov A. S. Pollution and climatic influence on trees in the Siberian Arctic wetlands // Water. 2023. V. 15. Iss. 2. Article 215. 18 p.
- Kirdyanov A. V., Myglan V. S., Pimenov A. V., Knorre A. A., Ekart A. K., Vaganov E. A. Die-off dynamics of Siberian larch under the impact of pollutants emitted by Norilsk enterprises // Contemp. Probl. Ecol. 2014. V. 7. N. 6. P. 679–684 (Original Rus. Text © A. V. Kirdyanov, V. S. Myglan, A. V. Pimenov, A. A. Knorre, A. K. Ekart, E. A. Vaganov, 2014, publ. in Sib. ecol. zhurn. 2014. N. 6. P. 945–952).
- Kirdyanov A. V., Saurer M., Arzac A., Knorre A. A., Prokushkin A. S., Churakova (Sidorova) O. V., Arosio T., Bechuk T., Siegwolf R. T. W., Böntgen U. Thawing permafrost can mitigate warming-induced draught stress in boreal forest trees // Sci. Total Environ. 2024. V. 912. Article 168858.
- Knorre A. A., Siegwolf R. T. W., Kirdyanov A. V., Saurer M., Sidorova O. V., Prokushkin A. S. Fire as a major factor in dynamics of tree-growth and stable $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ variations in larch in the permafrost zone // Forests. 2022. V. 13. Iss. 5. Article 725. 17 p.
- Li Q., Marshall J., Rye C. D., Romanou A., Rind D., Kelley M. Global climate impacts of Greenland and Antarctic meltwater: A comparative study // J. Climate. 2023. V. 36. N. 11. P. 3571–3590.
- Nikolaev A. N., Fedorov P. P., Desyatkin A. R. Effect of hydrothermal conditions of permafrost soil on radial growth of larch and pine in Central Yakutia // Contemp. Probl. Ecol. 2011. V. 4. N. 2. P. 140–149 (Original Rus. Text © A. N. Nikolaev, P. P. Fedorov, A. R. Desyatkin, 2011, publ. in Sib. ecol. zhurn. 2011. V. 18. N. 2. P. 189–201).
- Prislan P., Schmitt U., Koch G., Gričar J., Čufar K. Seasonal ultrastructural changes in the cambial zone of beech (*Fagus sylvatica*) grown at two different altitudes // IAWA J. 2011. V. 32. N. 4. P. 443–459.
- Schweingruber F. H. Tree rings and environment: Dendroecology. Berne, Switzerland: Paul Haupt, 1996. 609 p.
- Yasue K., Kujansuu J., Kajimoto T., Nakai Y., Koike T., Abaimov A. P., Matsuura Y. Seasonal changes in stem radial growth of *Larix gmelinii* in Central Siberia in relation to its climatic responses // Permafrost ecosystems: Siberian larch forests / A. Osawa, O. A. Zyryanova, Y. Matsuura, T. Kajimoto, R. W. Wein (Eds.). Ecol. Stud. V. 209. Springer Dordrecht, 2010. P. 331–345.

RADIAL GROWTH OF TREES IN ANTHROPOGENICALLY MODIFIED LARCH FOREST OF THE CRYOLITHOZONE

V. E. Benkova¹, A. V. Benkova¹, D. A. Mashukov¹, A. S. Prokushkin¹,
A. V. Shashkin¹, E. A. Shashkin¹, A. V. Kachaev²

¹ V. N. Sukachev Institute of Forest, Russian Academy of Sciences, Siberian Branch
Federal Research Center Krasnoyarsk Scientific Center, Russian Academy of Sciences, Siberian Branch
Akademgorodok, 50/28, Krasnoyarsk, 660036 Russian Federation

² Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
Prospekt imeni gazety «Krasnoyarskiy Rabochiy», 31, Krasnoyarsk, 660037 Russian Federation

E-mail: benkova@yandex.ru, annie1977@yandex.ru, mashukov1988@gmail.com,
prokushkin@ksc.krasn.ru, shashkin@ksc.krasn.ru, onlytmp@mail.ru, avkachaev@gmail.com

The effect of anthropogenic impact (cutting of a «winter road» in 1984, in effect until 2002) on the radial growth dynamics of Gmelin larch trees (*Larix gmelinii* (Rupr.) Rupr.), growing in permafrost larch forest has been analyzed. It has been established, that after the construction of the winter road the tree ring widths of the trees within the anthropogenically disturbed area increased sharply and after several years reached the peak values (0.971–1.601) mm, while in the natural stand it remained at the level of 0.121 ± 0.003 mm. Measurements showed that at the end of August (2017) the seasonally thawing layers on the abandoned road site and on the forest edge site (119.1 ± 18.4 and 71.9 ± 6.8 cm) were significantly larger than that in the natural stand (54.8 ± 5.8 cm). I.e., in the latter the temperature of the seasonally thawing layer increased faster and took on higher values. Using sliding climatic response functions of the radial increment indices, we revealed that anthropogenic impact modified the response of the trees to the influence of climatic factors. They manifested an earlier, in comparison with the natural stand, reaction of trees to spring-early summer air temperatures that show an earlier start of growth of the annual ring. We revealed also longer (end of May – end of June) dependence of the trees growing on the forest edge to precipitation compared to the native forest (end of May – beginning of June). We concluded that the modifications of the climatic response and a sharp increase of radial increment were due to the improvement of hydrothermal growth conditions in the anthropogenically disturbed area. Using extrapolation of the radial growth curves to future period of time, we can come to recognize that after finishing exploitation of the road in 2002, hydrothermal soil conditions and tree ring values in the anthropogenically modified forest sites will «return» to the background state in about 30 years, which is similar to post-pyrogenic restoration. Taking into account post-anthropogenic long-term effect manifested in improving the hydrothermal growth conditions, reducing the thickness of the organic layer and the formation of larger radial growth increments, the estimations of carbon balance in boreal forests growing on permafrost soils will make a significant improvement.

Keywords: radial increment, Gmelin larch, anthropogenic impact, hydrothermal soil conditions, climate factors.

How to cite: Benkova V. E., Benkova A. V., Mashukov D. A., Prokushkin A. S., Shashkin A. V., Shashkin E. A., Kachaev A. V. Radial growth of trees in anthropogenically modified larch forest of the cryolithozone // *Sibirskij Lesnoj Zhurnal* (Sib. J. For. Sci.). 2024. N. 5. P. 35–46 (in Russian with English abstract and references).