ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЕ СТАТЬИ

Памяти Евгения Александровича Шашкина,
принимавшего участие в измерениях, расчетах
и представлении наглядного материала для статьи.

УДК 630*561.24

СЕЗОННЫЙ РОСТ ГОДИЧНОГО КОЛЬЦА ЛИСТВЕННИЦЫ ГМЕЛИНА В АНТРОПОГЕННО ИЗМЕНЕННОМ ЛИСТВЕННИЧНИКЕ КРИОЛИТОЗОНЫ

В. Е. Бенькова, А. В. Бенькова, А. В. Шашкин, Д. А. Машуков, А. С. Прокушкин

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

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

Поступила в редакцию 04.08.2025 г.
Принята к публикации 05.11.2025 г.

Приведены результаты исследования внутрисезонного радиального роста деревьев лиственницы Гмелина (*Larix gmelinii* (Rupr.) Rupr.) в криогенном лиственничнике послепожарного возобновления на антропогенно измененном участке (бровка дороги сезонного использования) и на участке леса без антропогенных нарушений. Непрерывные измерения радиального прироста в течение сезона у опытных деревьев проводились точечными дендрометрами DR-26A в сезоны 2017–2019 гг., существенно различавшиеся по погодным условиям. Динамику внутрисезонного роста годичного кольца индивидуального дерева характеризовали совокупностью максимальных суточных значений прироста. С применением аппроксимирующего логистического уравнения Перла – Рида (R^2 = 68–99 %) определены фенологические характеристики для каждого дерева: даты начала и окончания сезона, продолжительность сезона и трех его этапов (дни), максимальная интенсивность на втором этапе роста (мм/день). Выявлено, что ширина годичного кольца (ШГК) определяется максимальной интенсивностью на втором этапе процесса роста (R = 78–97 %). На антропогенно измененном участке ШГК существенно больше, чем на контрольном, независимо от погодных условий сезона. Установлено, что у деревьев на контрольном участке прирост за сезон в 2019 г. был меньше, а на антропогенно измененном, наоборот, больше, чем в 2018 г. Противоположные тренды ШГК трактуются на основе ранее полученных оценок связи прироста с климатическими факторами (Бенькова и др., 2024): максимальная интенсивность роста кольца в течение сезона и ШГК на опытных участках определяется погодными условиями на разных стадиях ксилогенеза. На антропогенно измененном участке — это период, предваряющий сезон роста (начало мая), когда погодные условия предопределяют максимальную интенсивность прироста кольца, связанную с процессом образования новых трахеид. На контрольном участке – это погодные условия в более поздний период сезона (конец мая – первая половина июня); они влияют непосредственно на ход процесса образования новых трахеид.

Ключевые слова: *северотаежный лиственничник, дендрометрия, антропогенное нарушение, погодные условия, логистическая модель роста, ксилогенез.*

DOI: 10.15372/SJFS20250602

© Бенькова В. Е., Бенькова А. В., Шашкин А. В., Машуков Д. А., Прокушкин А. С., 2025

ВВЕДЕНИЕ

Потепление климата, наиболее выраженное в последние десятилетия, нашло свое отражение в изменении жизненного состояния лесов и их продуктивности, в распространении суховершинности, в изменении интенсивности роста и модификации климатического отклика радиального прироста деревьев (Bigler et al., 2006; Allen et al., 2010; Бенькова и др., 2012; Liu et al., 2018; и др.). Тенденции погодичного изменения радиального роста стволов деревьев при текущем потеплении, как было установлено в ряде работ, могут быть противоположными. Так, на фоне текущего изменения климата темпы роста лиственницы Гмелина (*Larix gmelinii* (Rupr.) Rupr.) в засушливых условиях на северо-востоке Китая (западные отроги Дасингань) характеризуются убывающим трендом (Zhang et al., 2016), а в лесах криолитозоны (на полярной границе леса на юго-востоке п-ова Таймыр и в северной тайге Центральной Эвенкии) – возрастающим (Бенькова и др., 2012, 2015; Машуков и др., 2018). Потепление и аридизация климата на о. Тайвань в последние десятилетия модифицировали климатический отклик радиального прироста сосны тайваньской (*Pinus taiwanensis* Hayata). В нем проявилась положительная корреляция с температурой воздуха в период до начала вегетации и с количеством осадков – в начале июля (Liu et al., 2018). Для понимания сути происходящих изменений в ростовых процессах, вызванных изменениями условий произрастания, проводятся исследования закономерностей процесса внутрисезонного роста (Брюханова и др., 2013; Vieira et al., 2013; Bryukhanova et al., 2013; Cruz-Garsia et al., 2019; Babushkina et al., 2022; и др.). При этом часто используют дендрометры высокого разрешения (Zweifel et al., 2001; Deslauriers et al., 2003, 2007*b*; Bouriaud et al., 2005; Duchesne et al., 2012; Cruz-Garsia et al., 2019; Li et al., 2022; и др.).

Ход внутрисезонного радиального роста ствола, так же, как и других биологических процессов, состоящих из стадий естественного снижения физиологической активности, удобно описывать S-образными (сигмоидными) функциями, например Гомпертца и Вейбулла (Rossi et al., 2003; Duchesne et al., 2012; Cruz-Garsia et al., 2019), логистической функцией Перла – Рида (Hosmer, Lemeshow, 2000; Li et al., 2022) и др. На S-образной кривой выделяются как минимум три последовательных участка, описывающих этапы сезонного роста годичного кольца: первый характеризуется сравнительно малой медленно возрастающей скоростью, затем следуют довольно продолжительный второй этап роста с максимальной стабильной скоростью и третий этап, в течение которого скорость роста постепенно снижается до полной его остановки (Rossi et al., 2006; Maaten et al., 2018). Соотношение этих этапов по продолжительности может быть очень разнообразным, в зависимости от множества внешних и внутренних факторов (Кузьмичев, 2013; Li et al., 2022). В частности, реакцию криогенных лесов на комплексное влияние антропогенных и природных факторов сложно оценить и прогнозировать.

В последнее время возросла необходимость в интенсификации исследований изменений в динамике роста лесов криолитозоны в связи с меняющимися условиями произрастания. Это связано не только с изменениями климатических и сопутствующих (например, эдафических) условий (Николаев и др., 2011; Nikolaev et al., 2011; Kirdyanov et al., 2024; и др.), но и с прогрессирующим антропогенным «воздействием» (прокладка дорог, геологические изыскания, лесозаготовки, строительство объектов и др.). Ранее нами было показано, что на антропогенно измененном участке северотаежного лиственничника, расположенного вблизи дороги сезонного назначения («зимника»), динамика радиального прироста и реакция на влияние климатических факторов деревьев резко отличаются от таковых на контрольном участке в глубине леса (Бенькова и др., 2024). Очевидно, что динамика внутрисезонного роста годичного кольца у деревьев на опытных участках также будет иметь отличительные особенности.

Цель настоящего исследования – с применением дендрометрического метода выявить отличительные особенности внутрисезонной динамики роста годичного кольца в сезоны с разными погодными условиями у деревьев на антропогенно измененном участке лиственничного леса на многолетнемерзлых почвах (данное исследование является продолжением работы В. Е. Беньковой с соавт. (2014).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проводилось вблизи пос. Тура, на базе Эвенкийского опорного экспедиционного пункта Института леса им. В. Н. Сукачева СО РАН.

Климат района семигумидный, резко континентальный (Прокушкин и др., 2008). Среднемноголетние месячные климатические харак-

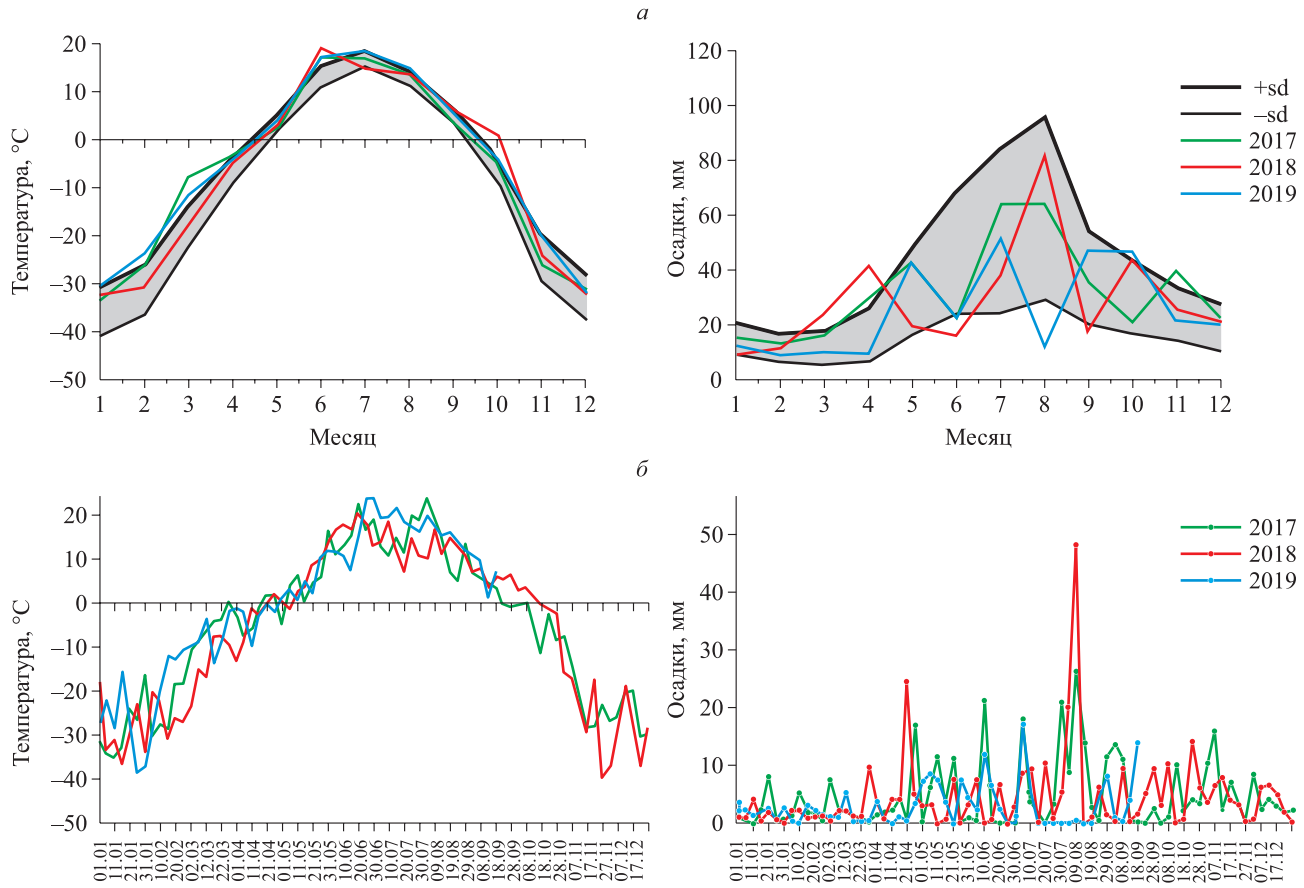

Рис. 1. Температура воздуха и осадки по данным метеостанции «Тура».

а – среднемноголетние месячные значения за 1934–2017 г., среднемесячные значения в опытные годы (2017–2019) и стандартные отклонения от средних (± sd, поле серого цвета); *б* – усредненные значения за 5 сут за 2017–2019 гг.

теристики и стандартное отклонение от средних (± sd) оценены нами по суточным данным метеостанции «Тура» за 1934–2019 гг.: средняя температура января –36.0 °С, июля 16.8 °С, среднегодовое количество осадков 364 мм (National Weather…, 2025) (рис. 1, *а*). Судя по значениям стандартного отклонения от средних, количество осадков в летний период в районе исследования отличается гораздо более высокой вариабельностью, чем температура воздуха.

Почвы района исследования криогидроморфные криоземы гомогенные. Положительные температуры под моховым покровом фиксировались с начала июня до конца сентября (Ершов, 1994; Прокушкин и др., 2008; Машуков и др., 2020; Mashukov et al., 2021). Почвы характеризуются высокой мозаичностью гидротермических условий (Зырянова и др., 2006).

Лиственница Гмелина формирует преимущественно монодоминантные древостои (Абаимов и др., 1997). Исследование внутрисезонной динамики роста лиственницы проводили в криогенном одновозрастном 120-летнем лиственничнике багульниково-брусничном зеленомошном (10Лц; V класс бонитета) послепожарного возобновления, произрастающем на склоне северной экспозиции с уклоном примерно 2°. Однородность его в 1984 г. была нарушена прокладкой дороги сезонного назначения (зимника). Для исследования были использованы две пробные площадки (пп) из заложеных ранее для изучения антропогенного влияния на погодичный радиальный рост (Бенькова и др., 2024). Пп КР0 располагалась непосредственно на бровке дороги, а контрольная пп ЛЕ – в глубине леса, в 100 м от пп КР0. На момент наблюдения в 2017 г. деревья на пп КР0 отличались от деревьев того же возраста на пп ЛЕ лучшим жизненным состоянием, более развитой кроной, большей высотой и диаметром. На пп ЛЕ средние (± sd) по 10 здоровым деревьям значения диаметра на высоте 1.3 м от шейки корня и высоты равны 6.5 ± 2.5 см и 5.9 ± 1.5 м, а на пп КР0 – 9.1 ± 1.5 см и 9.1 ± 1.3 м соответственно. Примерно 30 % деревьев на пп ЛЕ были суховершинными, а на пп КР0 они не встречались. Эти различия объяснялись в цитируемой выше работе лучшими гидротермическими свойствами

почвы на пп КР0. Действительно, измерения, проведенные в 2017 г. А. С. Прокушкиным и сотрудниками лаборатории биогеохимических циклов, показали, что непосредственно на дороге и вблизи нее почвы прогреваются быстрее, и в течение сезона их температура имеет более высокие значения, чем на контроле (Бенькова и др., 2024).

Дендрометрические измерения. В 2018 г. измерения проводили на 6 деревьях на пп ЛЕ и 5 деревьях на пп КР0. Деревья различались по диаметру (и, соответственно, длине окружности) ствола. Деревья 140с и 217с на пп ЛЕ были с сухими верхушками, но в 2019 г. дерево 257 оказалось непригодным для измерения, и освободившийся дендрометр установили на дерево 294 на пп ЛЕ. Для обозначения каждого дерева удобно было использовать значения длины окружности ствола (табл. 1).

Для проведения измерений кумулятивного радиального сезонного прироста использовался приборно-измерительный комплекс производства EMS (Чешская республика, г. Брно). В его состав входили модули регистрации стволового сокодвижения по методу THB (EMS-51A) и точечные дендрометры DR-26A для изменения текущего радиального размера стволов с точность 1 мкм, которые ставились на каждое опытное дерево на высоте 1.3 м от поверхности почвы, а также датчики температуры и влажности почвы (рис. 2). Данные измерений регистрировались с интервалом в 10 мин и пересчитывались в среднечасовые значения радиуса ствола (мм). На пп ЛЕ приборы ставили в сезоны 2017–2019 гг., а на пп КР0 – в 2018 и 2019 гг.

Эти годы в исследуемом районе были отмечены аномальными климатическими событиями (рис. 1, *а*,): 2017 и 2019 гг. – аномально высокими мартовскими температурами, которые превысили верхний предел изменения среднемноголетних месячных температур (+sd).

Аномально жарким и засушливым был июнь в 2018 г.; засушливыми – июнь и август в 2019 г. Погодные условия сезонов 2017–2019 гг. существенно различались между собой (рис. 1, *б*).

Таблица 1. Обозначение опытных деревьев по длине окружности ствола на высоте 1.3 м от шейки корня

пп	*L*, мм					
ЛЕ	140с	153	217с	263	302	324
КР0		165	222	257	267	320

Примечание. Деревья 140с и 217с – суховершинные.

Рис. 2. Опытные деревья лиственницы Гмелина на бровке дороги (пп КР0) с установленным на них приборно-измерительным комплексом.

В начале каждого сезона дендрометры устанавливали на одних и тех же деревьях в начале июня и снимали в конце августа (в выборе опытных деревьев и установке оборудования принимал участие Й. Урбан (Urban et al., 2019).

Вариабельность радиальных размеров ствола, которую фиксирует дендрометр, обусловлена обратимыми и необратимыми процессами (Zweifel et al., 2001, 2006; Čermák et al., 2007; и др.). К обратимым процессам относятся дневная потеря воды стволовой древесиной при транспирации и ночное ее восполнение (рефилинг). На интенсивность обоих процессов влияют метеоусловия.

Затяжные дожди/засуха в течение нескольких суток увеличивают набухание/потерю влаги древесиной ствола, и это сказывается на показаниях дендрометра. Процессы рефилинга и транспирации в течение суток маскируют в показаниях дендрометра необратимый процесс – суточный прирост радиуса ствола (вторичной ксилемы). Для того, чтобы в суточных показаниях дендрометра нивелировать уменьшение радиального размера ствола в дневное время, мы из среднечасовых значений, зарегистрированных в течение суток, выбирали одно максимальное значение. Оно соответствует предрассветному времени, когда ствол дерева максимально (для рассматриваемых суток) насыщен водой (Bouriaud et al., 2005; Zweifel et al., 2001; Čermák et al., 2007; Li et al., 2022). В результате для каждого опытного дерева получили сезонный ряд значений суточных приростов радиуса ствола, отражающий кумулятивный внутрисезонный радиальный прирост или сезонный рост годичного кольца. Ряд значений суточных приростов для каждого дерева мы аппроксимировали

S-образной логистической функцией Перла – Рида (R^2 = 68–99 %):

$$Y = a/(1 + bc^{-cx}), \quad (1)$$

где Y – текущий посуточный прирост; a – верхняя асимптота; a, b и c – параметры, которые подбираются для каждого сезона по достижении максимально возможного соответствия аппроксимирующей функции с ходом сезонного роста по данным дендрометрических измерений, параметр c характеризует скорость изменения Y; x – время (день года).

Аппроксимация позволила нивелировать следующие «шероховатости» в рядах реальных дендрометрических данных. Начальные значения сезонного прироста могли быть реконструированы, если установка дендрометров весной «опоздала» относительно старта роста из-за труднодоступности объектов исследования. Сглаживались кратковременные убывающие или возрастающие тренды, которые появлялись в показаниях дендрометров уже после остановки роста годичного кольца и были обусловлены изменчивостью влажности древесины ствола при изменении погодных условий (рис. 3).

С использованием функции (1) рассчитали некоторые фенологические характеристики сезонного роста каждого дерева. Старт и окончание сезона роста кольца рассчитывали на основе принятого некоторыми авторами подхода (Rossi et al., 2003; Deslauriers et al., 2007*a*; Maaten et al., 2018; Liu et al., 2018; и др.). Старт соответствовал дате, когда расчетное значение Y примерно на 5 % становилось больше нуля (рис. 3, точка *1*); дата окончания сезона роста (точка *4*) соответствовала дате, когда значение Y составляло примерно 95 % от верхней асимптоты a.

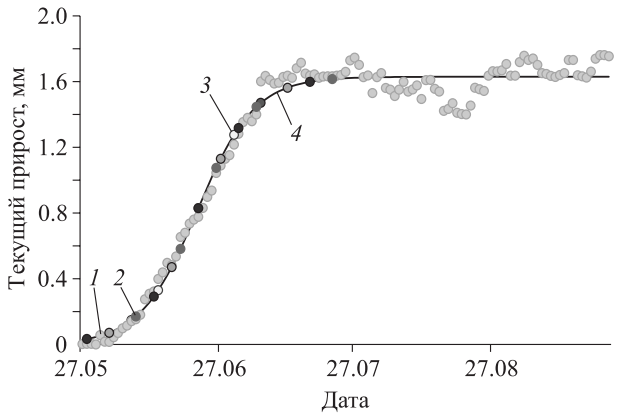

Рис. 3. Посуточный радиальный прирост (точки) дерева 320 на бровке дороги (пп КР0) по дендрометрическим данным в сезон 2019 г.

1 – начало сезона роста; *2* – конец первого – начало второго этапа роста; *3* – конец второго – начало третьего этапа; *4* – конец сезона роста.

Первый этап роста кольца соответствует отрезку на кривой (*1–2*), отражающему постепенное увеличение скорости роста, второй этап – линейному отрезку (*2–3*), по которому определяли максимальную скорость роста за сезон, третий этап – отрезку на кривой (*3–4*), отражающему постепенное уменьшение скорости роста до нулевого значения.

Последнее означает, что текущий прирост достиг предельного значения в сезоне, примерно равного ширине годичного кольца (ШГК). Полученные характеристики соотносились с результатами ксилотомических наблюдений за ростом годичного кольца у деревьев лиственницы вблизи нашего места исследования (Брюханова и др., 2013; Bryukhanova et al., 2013).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Аппроксимированные логистической функцией Перла – Рида (R^2 = 68–90 %) кривые текущего прироста годичного кольца у деревьев на пп ЛЕ в сезоны 2017, 2018 и 2019 гг. и на пп КР0 в сезоны 2018 и 2019 гг. приведены на рис. 4.

Установлено, что начало сезонного роста в 2018 у деревьев на обеих пп приходилось на 29–31 мая. Предсезонный период в 2019 г. был существенно теплее (рис. 1, *б*), и сезон начался на несколько дней раньше: 25–27 мая пп ЛЕ и 26 мая на пп КР0 (табл. 2). Даты начала роста суховершинных и соседних здоровых деревьев не различались.

На обеих пп остановка сезонного радиального роста опытных деревьев в 2018 и 2019 гг. пришлась на первую половину июля, причем в антропогенно измененных условиях на пп КР0 – на несколько дней позже, чем на пп ЛЕ (табл. 2).

Медленно растущие, в том числе суховершинные (140с, 153, 217с, пп ЛЕ) деревья остановились в росте раньше (3–6 июля), чем соседние здоровые (8–10 июля). Выраженной разницы в датах остановки роста деревьев на каждой пп в сезоны 2018 и 2019 гг., характеризующихся существенно разными погодными условиями в этот период сезона (рис. 1, *б*), не выявлено.

Самым коротким периодом сезонного роста отличались медленно растущие и суховершинные деревья на пп ЛЕ: в 2018 г. – 36 дней, а в 2019 г. – 38–42 дня.

У соседних здоровых деревьев этот показатель составил 42 дня в 2018 г. и 45–46 дней

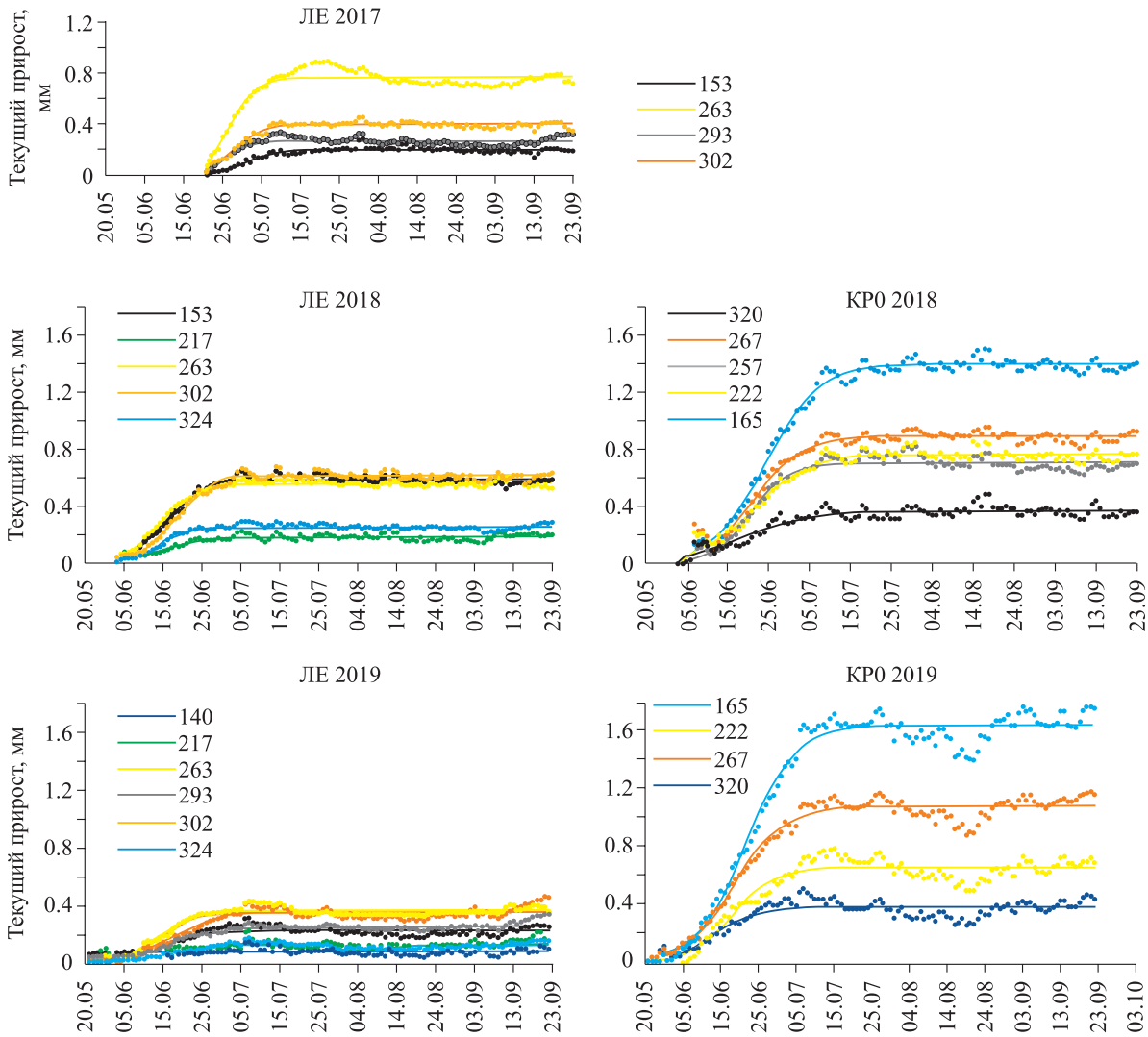

Рис. 4. Текущий радиальный прирост в 2017–2019 гг. у опытных деревьев лиственницы Гмелина в глубине леса (пп ЛЕ) и у бровки дороги (пп КР0).

в 2019 г. На пп КР0 сезонный рост длился дольше: в 2018 г. – 44–50 дней, а в 2019 г. – 41–52 дня.

В лучших гидротермических условиях на пп КР0 продолжительность сезонов роста за 2018 и 2019 гг. была больше, чем на пп ЛЕ: в 2018 г. – 0.36–1.39 мм на первой пп и 0.26–0.61 мм на второй, в 2019 г. – 0.38–1.62 мм и 0.14–0.35 мм соответственно. Сравнительно теплое начало мая в 2019 г. «спровоцировало» старт сезонного роста на пп ЛЕ на несколько дней раньше, чем в предыдущий год и на 2 нед раньше, чем в 2017 г. (рис. 4). В то же время прирост за сезон 2019 г. оказался значительно меньше (0.14–0.37 мм) по сравнению с 2018 (0.26–0.61 мм) и 2017 г. (0.26–0.75 мм).

Определены даты начала, окончания и интенсивность роста годичного кольца на втором этапе процесса роста для каждого опытного дерева (табл. 2). Самыми низкими значениями максимальной интенсивности сезонного роста (v) отличались суховершинные деревья: v = 2.0–5.0 мкм/день. У деревьев с отсутствием сухих вершин на пп ЛЕ в 2018 г. v = 13–23 мкм/день, а в 2019 г. – гораздо ниже, v = 6.0–14.5 мкм/день. На пп КР0, наоборот, значения v в 2018 г. были ниже, чем в 2019 г. (10.0–44.0 и 17.6–51.0 мкм/день соответственно). Корреляционная связь между значениями v и прироста за сезон у деревьев на обеих пп очень тесная: 78–97 %.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

На примере деревьев на пп ЛЕ было показано, что более ранняя дата начала, более поздняя дата окончания и бóльшая продолжительность сезонного роста относительно предыдущего сезона не всегда связаны с большей шириной

Таблица 2. Фенологические характеристики сезонного радиального роста лиственницы Гмелина в глубине леса (пп ЛЕ) и на бровке дороги (пп КР0) в 2018 и 2019 гг.

Номер дерева	Прирост за сезон (ШГК), мм	Дата			Продолжительность сезона, дни	Максимальная интенсивность роста кольца, $v \cdot 10^3$, мм/день
		начала сезонного роста	начала и окончания второго этапа роста / текущий прирост, мм	окончания сезона роста		
2018, пп ЛЕ						
140с	0.11	30.05	13.06–22.06 / 0.063–0.082	04.07	36	2.0
153	0.26	30.05	09.06–20.06 / 0.065–0.218	04.07	36	13.0
217с	0.18	30.05	9.06–21.06 / 0.065–0.131	04.07	36	5.0
263	0.56	29.05	07.06–23.06 / 0.100–0.457	09.07	42	21.0
302	0.61	29.05	08.06–25.06 / 0.072–0.497	09.07	42	23.0
324	0.58	29.05	09.06–26.06 / 0.113–0.526	09.07	42	23.0
2018, пп КР0						
165	0.36	30.05	08.06–22.06 / 0.110–0.314	17.07	49	10.0
222	0.75	31.05	08.06–23.06 / 0.158–0.530	15.07	46	24.0
257	0.70	29.05	09.06–24.06 / 0.119–0.582	11.07	44	30.0
267	0.89	29.05	09.06–27.06 / 0.173–0.743	15.07	48	30.0
320	1.39	29.05	11.06–30.06 / 0.276–1.142	17.07	50	44.0
2019, пп ЛЕ						
140с	0.10	27.05	09.06–18.06 / 0.04–0.065	03.07	38	2.0
153	0.14	26.05	08.06–19.06 / 0.030–0.0910	06.07	42	6.0
217с	0.14	27.05	09.06–18.06 / 0.070–0.114	06.07	41	4.0
263	0.37	26.05	06.06–21.06 / 0.0664–0.301	09.07	46	14.5
294	0.26	25.05	06.06–26.06 / 0.048–0.213	08.07	45	7.5
302	0.35	26.05	06.06–26.06 / 0.0396–0.295	09. 07	45	12.0
324	0.23	26..05	06.06–24.07 / 0.065–0.207	09.07	45	8.0
2019, пп КР0						
165	0.38	26.05	08.06–21.06 / 0.067–0.314	13.07	49	17.6
222	0.65	26.06	07.06–23.06 / 0.072–0.463	15.07	51	23.0
267	1.06	26.05	09.06–29.06 / 0.201–0.888	15.07	51	32.7
320	1.62	26.05	09.06–01.07 / 0.176–1.35	16.07	52	51.0

годичного кольца. В то же время оказалось, что ШГК на обеих пп тесно связана с максимальной интенсивностью роста, характерной для второго этапа процесса роста: чем она выше, тем больше ШГК. Последний результат находится в согласии с выводом S. Rossi и соавт. (2006), полученным ранее на представителях ели (*Picea* A. Dietr.), сосны (*Pinus* L.), пихты (*Abies* Mill.) и лиственницы (*Larix* Mill.) в сезоны 1996–2003 гг.

Выявлена противоположная реакция деревьев на антропогенно измененном и естественном участках древостоя на одинаковые изменения погодных условий. Так, прирост за сезон 2019 г. у лиственницы на первом участке оказался меньше, а на антропогенно измененном – наоборот, больше, чем в 2018 г. Для объяснения этих разнонаправленных трендов мы обратились к результатам предыдущей нашей работы (Бенькова и др., 2024). В ней выявлено, что ширину годичных колец на исследуемых пп определяют погодные условия разных периодов сезонного роста. На пп КР0 ширина кольца положительно коррелирует с температурой воздуха в начале мая, а на пп ЛЕ – с температурой воздуха и количеством осадков в конце мая-июне. По данным метеостанции «Тура» (рис. 1, *б*), в 2019 г. начало мая, предваряющее старт сезонного роста, было сравнительно теплым, примерно на 5–7 °С выше, чем в 2018 г., в то же время период конец мая – первая половина июня отличался сравнительно прохладной (до 7 °С относительно 17–23 °С в 2018 г.) и сухой погодой с заморозками 9–19 июня. Такие погодные условия в 2019 г. оказались более благоприятными, по сравнению с 2018 г., для сезонного роста годичного кольца у деревьев на пп КРО, и менее благоприятными – у деревьев на пп ЛЕ. Как следствие – в 2019 г. образовалось более широкое годичное кольцо на пп КРО и менее широкое – на пп ЛЕ по сравнению с 2018 г. (сравнивались приросты у одних и тех же деревьев). Исходя из вышесказанного, мы предположили, что прирост за сезон (и определяющая его интенсивность роста на втором этапе процесса сезонного роста) на опытных участках определяется погодными условиями на разных стадиях ксилогенеза. Более благоприятные, чем в 2018 г., погодные и другие сопутствующие локальные экологические (а именно, почвенные) условия в период, предваряющий начало сезонного роста 2019 г., на антропогенно измененном участке обусловили более раннюю реактивацию камбия и предопределили последующую сравнительно высокую интенсивность деления клеток на ранней стадии ксилогенеза (Turcotte et al., 2009), которая, судя по климатическому отклику (Бенькова и др., 2024), слабо зависит от погодных условий. В то же время, на контрольном участке менее благоприятные, чем в 2018 г., погодные условия в период конец мая – первая половина июня, действуя непосредственно на ход процесса образования новых трахеид, определили сравнительно низкую его интенсивность.

Суховершинные деревья не встречались на антропогенно измененном участке вблизи дороги, где были лучшие гидротермические почвенные условия. Старт роста годичного кольца в сезоны 2017–2019 гг. приходился примерно на то же время, что и у соседних здоровых деревьев, но остановка в росте произошла примерно на неделю раньше. Суховершинные деревья отличались от соседних здоровых более узким приростом за сезон, что обусловлено очень низкой интенсивностью второго этапа сезонного роста (табл. 2). Это может быть связано с более жестким дефицитом доступной почвенной влаги по сравнению с соседними здоровыми деревьями (косвенное подтверждение дано в публикациях Д. А. Машуков и др. (2020), D. A. Mashukov и соавт. (2021)) в связи с высокой пространственной мозаичностью гидротермических почвенных условий (Зырянова и др., 2006).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты дендрометрического исследования в северотаежном лиственничнике показали, что антропогенное нарушение (прокладка дороги сезонного назначания) вызвало не только резкое увеличение радиального прироста и изменение его «реакции» на влияние климатических факторов, но привело к изменению внутрисезонной динамики роста, в частности фенологических характеристик этого процесса. Оказалось, что более широкое годичное кольцо из двух сравниваемых не всегда имеет более раннюю дату начала, более позднюю дату окончания и бóльшую продолжительность сезона роста. Ширина кольца тесно и прямо связана с максимальной интенсивностью роста, характерной для второго этапа процесса сезонного роста: чем она выше, тем больше.

Результаты находятся в согласии с главной научной гипотезой: деревья лиственницы Гмелина в северотаежных лиственничниках, развивающихся на многолетнемерзлых почвах, испытывают дефицит доступной почвенной влаги (Машуков и др., 2018, Mashukov et al., 2021;

и др.). Степень водного дефицита определяет высокая мозаичность гидротермических почвенных условий, а антропогенные вмешательства увеличивают ее еще сильнее, обусловливая повышение интенсивности сезонного роста годичного кольца у лиственницы, произрастающей в зоне антропогенного влияния.

Авторы выражают благодарность А. Рубцову (СФУ, г. Красноярск) и Й. Урбану (Словацкий технологический университет, г. Брно, Словакия) за участие в проведении измерений и обработке первичных данных, а также А. Качаеву за помощь в проведении расчетов. Работа выполнена по государственному заданию: 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.

Бенькова А. В., Машуков 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.

Бенькова В. Е., Бенькова А. В., Машуков Д. А., Прокушкин А. С., Шашкин А. В., Шашкин Е. А., Качаев А. В. Радиальный рост деревьев в антропогенно-измененном лиственничнике криолитозоны // Сиб. лесн. журн. 2024. № 5. С. 35–46.

Бенькова В. Е., Зырянова О. А., Шашкин А. В., Бенькова А. В., Собачкин Д. С., Симанько В. В., Зырянов В. И. Влияние пространственной мозаичности мохово-лишайникового покрова на радиальный рост лиственницы Гмелина (Центральная Эвенкия) // Лесоведение. 2014. № 4. С. 41–49.

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.

Брюханова М. В., Кирдянов А. В., Прокушкин А. С., Силкин П. П. Особенности ксилогенеза лиственницы Гмелина в условиях криолитозоны Средней Сибири // Экология. 2013. № 5. С. 323–329.

Ершов Ю. И. Мезоморфное почвообразование в таежно-мерзлотном семигумидном секторе Средней Сибири // Почвоведение. 1994. № 10. С. 10–18.

Зырянова О. А., Абаимов А. П., Бугаенко Т. Н. Оценка видового разнообразия и структуры лиственничных ассоциаций криолитозоны Сибири // Биоразнообразие и динамика экосистем: информационные технологии и моделирование. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2006. С. 495–504.

Кузьмичев В. В. Закономерности динамики древостоев: принципы и модели. Новосибирск: Наука, 2013. 207 с.

Машуков Д. А., Бенькова А. В., Бенькова В. Е., Шашкин А. В., Прокушкин А. С. Значение экспозиции склонов для роста лиственницы Гмелина в мерзлотных условиях Средней Сибири. II. Особенности радиального роста на разной высоте стволов // Сиб. лесн. журн. 2018. № 3. С. 9–18.

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. 483–492.

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. № 2. С. 189–201.

Прокушкин С. Г., Абаимов А. П., Прокушкин А. С. Структурно-функциональные особенности лиственницы Гмелина в криолитозоне Центральной Эвенкии. Красноярск: ИЛ СО РАН, 2008. 161 с.

Allen C. D., Macalady A. K., Chenchouni H., Bachelet D., McDowell N., Vennetier M., Kitzberger T., Rigling A., Breshears D. D., Hogg E. H., Gonzalez P., Fensham R., Zhang Z., Castro J., Demidova N., Lim J.-H., Allard G., Running S. W., Semerci A., Cobb N. A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests // For. Ecol. Manag. 2010. V. 259. Iss. 4. P. 660–684.

Babushkina E. A., Sitnikov G. A., Upadhyay K. K., Zhirnova D. E., Zelenov G. K., Vaganov E. A., Belokopytova L. A. Seasonal growth of pine tree rings: Comparison of direct observations and simulation // Forests. 2022. V. 13. N. 12. Article 1978. 18 p.

Benkova V. E., Zyryanova O. A., Shashkin A. V., Benkova A. V., Sobachkin D. S., Simanko V. V., Zyryanov V. I. Influence of moss and lichen spatial mosaics on radial growth of Gmelin larch (Central Evenkia) // Contemp. Probl. Ecol. 2015. V. 8. N. 7. P. 854–861 (Original Rus. Text © V. E. Benkova, O. A. Zyryanova, A. V. Shashkin, A. V. Benkova, D. S. Sobachkin, V. V. Simanko, V. I. Zyryanov, 2014, publ. in Lesovedenie. 2014. N. 4. P. 41–49).

Bigler C., Braker O. U., Bugmann H., Dobbertin M., Rigling A. Drought as an inciting mortality factor in Scots pine stands of the Valais, Switzerland // Ecosystems. 2006. V. 9. Iss. 3. P. 330–343.

Bouriaud O., Leban J. M., Bert D., Deleuze C. Intra-annual variations in climate influence growth and wood density of Norway spruce // Tree Physiol. 2005. V. 25. Iss. 6. P. 651–660.

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).

Čermák J., Kučera N., Bauerle W. L., Phillips J., Hinckley T. M. Tree water storage and its diurnal dynamics related to sap flow and changes in stem volume in old-growth Douglas-fir trees // Tree Physiol. 2007. V. 27. Iss. 2. P. 181–198.

Cruz-Garsia A., Balzano A., Čufar K., Scharnweber T., Smiljanić M., Wilmking M. Combining dendrometer series and xylogenesis imagery – DevX, a simple visualization tool to explore plant secondary phenology // Front. For. Glob. Change. 2019. V. 2. Article 60.

Deslauriers A., Morin H., Urbinat C., Carrer M. Daily weather response of balsam fir (*Abies balsamea* (L.) Mill.) stem radius increment from dendrometer analysis in the boreal forests of Quebec (Canada) // Trees. 2003. V. 17. Iss. 6. P. 477–484.

Deslauriers A., Anfodillo T., Rossi S., Carraro V. Using simple causal modeling to understand how water and temperature affect daily stem radial variation in trees // Tree Physiol. 2007*a*. V. 27. Iss. 8. P. 1125–1136.

Deslauriers A., Rossi S., Anfodillo T. Dendrometers and intra-annual tree growth: What kind of information can be inferred? // Dendrochronologia. 2007*b*. V. 25. Iss. 2. P. 113–124.

Duchesne L., Houle D., D'Orangeville L. Influence of climate on seasonal patterns of stem increment of balsam fir in a boreal forest of Quebec, Canada // Agr. For. Meteorol. 2012. V. 162–163. P. 108–114.

Hosmer D. W., Lemeshow S. Applied logistic regression. New York: John Wiley & Sons, 2000. 408 p.

Kirdyanov A. V., Kolmogorov A. I., Kruse S., Herzschuh U., Arzac A., Pestryakova L. A., Nikolaev A. N., Bebchuk T., Büntgen U. Arctic amplification causes earlier onset of seasonal tree growth in northeastern Siberia // Environ. Res. Lett. 2024. V. 19. Iss. 11. Article 114091. 11 p.

Li W., Yue F., Wang C., Liao J., Zhang X. Climatic influences on intra-annual stem variation of *Larix principis-rupprechtii* in a semi-arid region // Front. For. Glob. Change. 2022. V. 5. Article 948022.

Liu Y. Y., Wang A. Y., An Y. N., Lian P. Y., Wu D. D., Zhu J. J., Meinzer F. C., Hao G.-Y. Hydraulics play an important role in causing low growth rate and dieback of aging *Pinus sylvestris* var. *mongolica* trees in plantations of Northeast China // Plant Cell Environ. 2018. V. 41. Iss. 7. P. 1500–1511.

Maaten E. van der, Pape J., Maaten-Theunissen M. van der, Scharnweber T., Smiljanic M., Cruz-Garcia R., Wilmking M. Distinct growth phenology but similar daily stem dynamics in three co-occurring broadleaved tree species // Tree Physiol. 2018. V. 38. Iss. 12. P. 1820–1828.

Mashukov D. A., Benkova A. V., Benkova V. E., Shashkin A. V., Prokushkin A. S. Radial growth and anatomic structure of the trunk wood of healthy and stag-headed larch trees on permafrost // Contemp. Probl. Ecol. 2021. V. 14. N. 7. P. 767–774 (Original Rus. Text © D. A. Mashukov, A. V. Benkova, V. E. Benkova, A. V. Shashkin, A. S. Prokushkin, 2020, publ in Lesovedenie. 2020. N. 6. P. 483–492).

National weather service. Internet weather source, 2025. ftp:/ ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/ghcn/daily

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. N. 4. P. 140–149 (Original Rus. Text © A. N. Nikolaev, P. P. Fedorov, A. R. Desyatkin, 2011, publ. in Sib. ekol. zhurn. 2011. V. 18. N. 2. P. 189–201).

Rossi S., Deslauriers A., Morin H. Application of the Gompertz equation for the study of xylem cell development // Dendrochronologia. 2003. V. 21. Iss. 1. P. 33–39.

Rossi S., Deslauriers A., Anfodillo T., Morin H., Saracino A., Motta R., Borghetti M. Conifers in cold environments synchronize maximum growth rate of tree-ring formation with day length // New Phytol. 2006. V. 170. Iss. 2. P. 301–310.

Turcotte A., Morin H., Krause C., Deslauriers A., Thibeault-Martel M. The timing of spring rehydration and its relation with the onset of wood formation in black spruce // Agr. For. Meteorol. 2009. V. 149. Iss. 9. P. 1403–1409.

Urban J., Rubtsov A. V., Urban A. V., Shashkin A. V., Benkova V. E. Canopy transpiration of a *Larix sibirica* and *Pinus sylvestris* forest in Central Siberia // Agr. For. Meteorol. 2019. V. 271. P. 64–72.

Vieira J., Rossi S., Campelo F., Freitas H., Nabais C. Seasonal and daily cycles of stem radial variation of *Pinus pinaster* in a drought-prone environment // Agr. For. Meteorol. 2013. V. 180. Iss. 2. P. 173–181.

Zhang X. L., Bai X. P., Chang Y. X., Chen Z. J. Increased sensitivity of Dahurian larch radial growth to summer temperature with the rapid warming in Northeast China // Trees. 2016. V. 30. Iss. 5. P. 1799–1806.

Zweifel R., Item H., Häsler R. Link between diurnal stem radius changes and tree water relations // Tree Physiol. 2001. V. 21. Iss. 12–13. P. 869–877.

Zweifel R., Zimmermann L., Zeugin F., Newbery D. M. Intra-annual radial growth and water relations of trees: Implications towards a growth mechanism // J. Exp. Bot. 2006. V. 57. Iss. 6. P. 1445–1459.

SEASONAL GROWTH OF GMELIN'S LARCH TREE RINGS IN THE ANTHROPOGENICALLY ALTERED CRYOGENIC LARCH FOREST

V. E. Benkova, A. V. Benkova, A. V. Shashkin, D. A. Mashukov, A. S. Prokushkin

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

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

The results of a study of the intraseasonal radial growth of Gmelin larch (*Larix gmelinii* (Rupr.) Rupr.) trees growing in a cryogenic larch forest on an anthropogenically modified site (the edge of a seasonal road) and on a natural forest site without anthropogenic disturbances are presented. Continuous measurements of radial growth during the season were conducted on experimental trees using DR-26A point dendrometers during the 2017–2019 seasons, which differed significantly in terms of weather conditions. The dynamics of intra-seasonal growth of the annual ring of an individual tree was characterized by a set of maximum daily values. Using the Pearl-Reed approximating logistic equation (R^2 = 68–99 %), the main phenological characteristics of tree ring seasonal growth for each tree were determined: the dates of the start and end of the growth season, duration of three stages of the growth season (in days), and the maximum growth intensity (mm/day) during the second stage. It was found that the tree ring width of the annual ring (TRW) is determined by the maximum intensity during the second stage of seasonal growth (R = 78–97 %). In the anthropogenically modified site, the TRW is significantly wider than in the control area, regardless of the weather conditions during the season. The tree rings formed in the trees on the control site in 2019 was narrower than those in 2018, while they were wider in the anthropogenically modified site. The opposite trends are interpreted based on previously obtained relationships between radial increments and climatic factors (Benkova et al., 2024). The maximum intensity of tree ring growth during the season and TRW in the experimental sites are determined by weather conditions at different stages of xylogenesis. In the anthropogenically altered site, this is the period preceding the growth season (early May), when the weather conditions pre-determine the value of maximum intensity of tree ring growth associated with the stage of formation of new tracheids. In the control site, this is the later period (late May to middle June), when the weather conditions directly affect the process of new tracheid formation.

Keywords: *northern taiga larch forest, dendrometry, anthropogenic disturbance, weather conditions, logistic growth model, xylogenesis.*

How to cite: *Benkova V. E., Benkova A. V., Shashkin A. V., Mashukov D. A., Prokushkin A. S.* Seasonal growth of Gmelin's larch tree rings in the anthropogenically altered cryogenic larch forest // *Sibirskij Lesnoj Zurnal* (Sib. J. For. Sci.). 2025. N. 6. P. 34–44 (in Russian with English abstract and references).