

ОЦЕНКА СТРУКТУРЫ ГОДИЧНОГО КОЛЬЦА У СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ (*PINUS SYLVESTRIS* L.) В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ВЛАЖНОСТИ ВОЗДУХА

С.Р. Кузьмин✉, Н.А. Кузьмина

Институт леса имени В.Н. Сукачёва Сибирского отделения Российской академии наук (ИЛ СО РАН) — обособленное подразделение ФГБНУ ФИЦ КНЦ СО РАН, Россия, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50, стр. 28

skr_7@mail.ru

Представлена оценка влияния относительной влажности воздуха на ширину годичных колец и долю поздней древесины у климатипов сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) разного географического происхождения, тестируемых в условиях лесостепи Новосибирской области и южной тайги Красноярского края. Выявлена и показана наиболее значимая корреляция признаков структуры древесины с относительной влажностью воздуха за определенные периоды на основе среднемесячных данных. Установлены основные различия между климатипами по характеру динамики ширины годичного кольца, связи структуры древесины с определенными временными интервалами в течение вегетационного периода. Выявлены различия между климатипами в корреляции с относительной влажностью в условиях лесостепи. В южной тайге, наоборот, — при одинаково значимом влиянии относительной влажности мая — июня на ширину годичного кольца отмечается различный характер ее динамики, который выражается не только в разных максимумах прироста, но и разнообразном характере восстановления радиального прироста после засушливых условий 2003 г.

Ключевые слова: географические культуры, климат, относительная влажность, адаптация, ширина годичного кольца, реакция на погоду

Ссылка для цитирования: Кузьмин С.Р., Кузьмина Н.А. Оценка структуры годичного кольца у сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в зависимости от относительной влажности воздуха // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2025. Т. 29. № 5. С. 86–97. DOI: 10.18698/2542-1468-2025-5-86-97

При оценке реакции деревьев на условия окружающей среды с точки зрения возникновения относительно засушливых или оптимальных условий в ходе онтогенеза относительная влажность воздуха (%) определяется как интегральный показатель. Этот показатель объединяет влияние температуры воздуха и количества выпавших осадков на реакцию деревьев, которая оценивается с помощью анализа структуры годичных колец. Общая закономерность зависимости транспирации от насыщенности водой атмосферного воздуха выражается следующим утверждением: чем меньше относительная влажность воздуха, тем выше интенсивность транспирации [1]. Таким образом, снижение относительной влажности воздуха способствует потере влаги растениями, в частности, через устьица. Использование относительной влажности воздуха как показателя, оказывающего влияние на ширину годичного кольца, в некоторых случаях дает более высокие значения коэффициента корреляции, чем при использовании данных по количеству

осадков или температуре воздуха [2–4]. Данные по ширине годичного кольца успешно использовались для реконструкции относительной влажности воздуха мая — июня [5]. Наряду со связью с температурой атмосферного воздуха относительная влажность воздуха имеет значимую корреляцию с такими переменными окружающей среды, как потоки диоксида углерода (валовая продуктивность экосистемы и чистый экосистемный обмен), дефицит давления водяного пара, фотосинтетически активная радиация [6], изотопы кислорода в ранней и поздней древесине [7]. Относительная влажность воздуха является ключевым фактором в адаптации устьиц к воздействию диоксида углерода [8].

Для территорий, которые расположены вблизи морей и океанов, в частности для Балтийского региона, с повышением температуры воздуха увеличивается количество осадков [9]. Этот факт способствует расширению исследований в области оценки влияния увеличения относительной влажности воздуха на ксилему древесных растений. Результаты экспериментальных исследований свидетельствуют о том, что, например, увеличение относительной влажности воздуха приводит к умеренным

изменениям в структуре и функционировании гибридной осины (*Populus tremula* L. x *Populus tremuloides* Michx.) [10], снижению плотности древесины у березы повислой (*Betula pendula* Roth) [11]. Исследованиями влияния эмболии клеток ксилемы, вызванной искусственной засухой, выявлены ограничения восстановления газового обмена у сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) [12]. Изучение деревьев, произрастающих в природных условиях, с признаками потери хвои и даже гибели отдельных особей вследствие сильных засух, показало, что несмотря на воздействие засух, деревья формируют трахеиды с высокими показателями гидравлического диаметра для эффективной транспортировки воды, невзирая на угрозу эмболии [13].

Изменения в гидравлических характеристиках ксилемы возникают по причине физиологической засухи в результате воздействия заморозков [14]. Одним из вариантов адаптации к таким условиям называют увеличение толщины клеточных стенок трахеид в ксилеме хвои [15]. Таким образом, причины засух и их последствия для деревьев могут быть разными.

В Сибири летом в 2010 и 2012 гг. была зафиксирована аномальная жара, хотя увеличивающиеся тенденции повышения температуры здесь были ниже, чем на северо-западе Китая и в Центральной Азии. Кроме того, в Сибири в летний период зафиксирована тенденция снижения количества ливневых осадков [16]. В Южной Сибири в летние месяцы не выявлено значимых изменений по индексу сухости и гидротермическим условиям за период 1980–2020 гг. Однако продолжительность засух в 2000–2020 гг. в течение вегетационного периода увеличилась, как и число экстремальных явлений, в частности избыточного увлажнения [17].

Исследования по испытанию происхождений сосны обыкновенной, выполненные в разные годы (1951–1996 гг.), кроме стран бывшего СССР, продолжаются на экспериментальных объектах в Испании [18, 19], Германии [20], Польше [21, 22], Турции [23], Боснии и Герцеговине [24], Швеции, Финляндии [19], Венгрии [25] и других странах. Современные исследования связаны в основном с вопросами адаптации растений к климатическим изменениям, перспективами лесовосстановительных мероприятий и создания плантаций в различных условиях обитания.

Цель работы

Цель работы — оценка влияния относительной влажности воздуха на ширину годичных колец и долю поздней древесины у климатипов сосны обыкновенной разного географического

происхождения, тестируемых в условиях лесостепи Новосибирской области и южной тайги Красноярского края.

Материалы и методы

Данные по среднемесячной относительной влажности воздуха получены из специализированных массивов для климатических исследований [26]. База данных среднемесячной относительной влажности воздуха содержит среднемесячные значения по 518 метеорологическим станциям России, начиная с 1966 г. по настоящее время [27]. Объем данных позволяет использовать этот источник при сравнительных аналитических исследованиях на широком диапазоне географических пунктов, включая данные Метеорологической станции II разряда «Камень-на-Оби» и Гидрометеорологической обсерватории «Богучаны», расположенные поблизости к двум пунктам испытания сосны обыкновенной с ее географическими культурами — в Сузунском и Богучанском лесничествах.

Объект исследований — потомства шести происхождений сосны обыкновенной, испытываемые в географических культурах, созданных в 1977 г. в Богучанском лесничестве Красноярского края (южная тайга) и Сузунском лесничестве Новосибирской области (лесостепь) в рамках единой государственной сети географических культур в СССР [28].

Участки в Новосибирской области и Красноярском крае различаются между собой почвенными условиями (темно-серая лесная почва в южной тайге, дерново-подзолистая — в лесостепи) и другими характеристиками [29]. В эксперименте представлены климатипы: богучанский и сузунский (контрольные), из средней тайги Архангельской области (плесецкий), южной тайги Красноярского края (енисейский) и горно-таежных областей на юге Сибири — из Тывы (балгазынский) и Республики Алтай (чемальский). Для каждого климатипа отбиралось по 10 деревьев, древесные керны исследовали с двух противоположных сторон (юго-восточной и северо-западной), данные по которым усреднялись. Методика сбора древесных кернов по каждому климатипу в условиях разных географических культур, лабораторные исследования, статистические методы и подходы обработки данных были едиными [30, 31].

Результаты и обсуждение

В географических культурах в лесостепи (Сузунский район Новосибирской области) у всех сравниваемых климатипов максимум

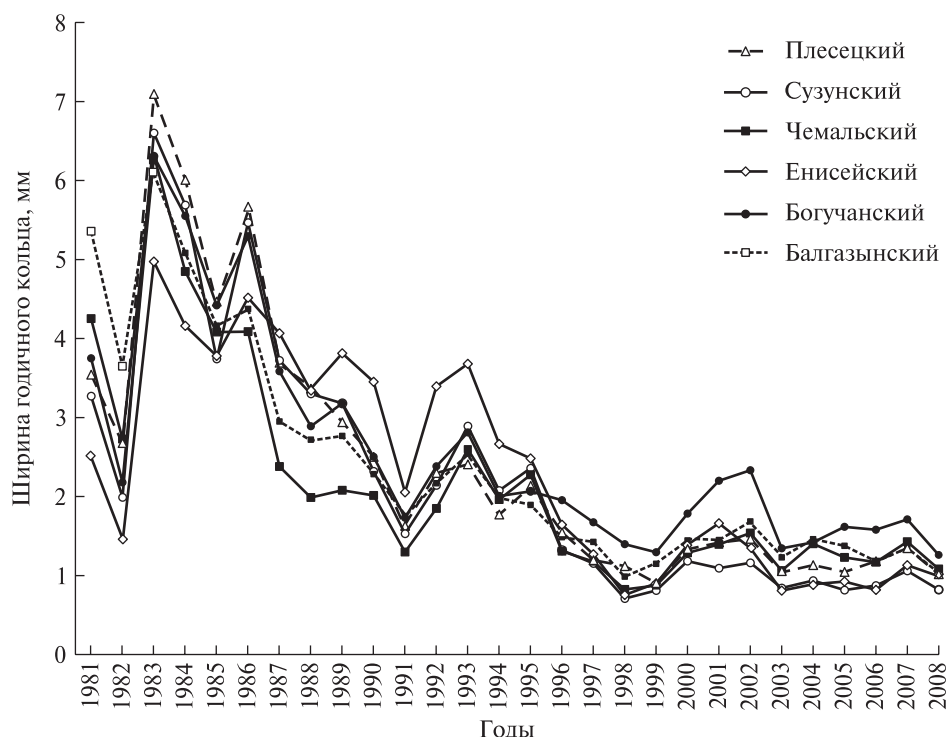


Рис. 1. Средняя динамика ширины годичного кольца у шести климатипов в географических культурах в лесостепи с 1981 по 2008 гг.

Fig. 1. Average annual ring width dynamics in six climatypes in geographical crops in the forest-steppe from 1981 to 2008

прироста отмечается в одном биологическом возрасте — 9 лет (1983). После периода максимальных значений прироста (1983–1986 гг.) у всех климатипов в лесостепи до 20-летнего возраста отмечается период значимого снижения радиального прироста, который можно охарактеризовать отрицательной линейной зависимостью. Этот факт также выявлен у енисейского климатипа ($y = -0,1874x + 4,8352$; $R^2 = 0,70$), у которого отмечается медленный спад прироста после максимума по сравнению с остальными климатипами. Максимум радиального прироста этого климатипа в среднем не превышает 5 мм, тогда как у остальных он выше 6 мм (рис. 1).

Анализ динамики ширины годичного кольца (ШГК, мм) в условиях лесостепи показал, что у потомства всех сравниваемых климатипов с 20 до 32-летнего возраста (1996–2008 гг.) отсутствует значимая линейная тенденция снижения радиального годичного прироста. Коэффициент детерминации (R^2) линейной зависимости ШГК с 20 до 32 лет — очень низкий: от 0,04, до 0,17. График динамики ШГК также показывает, что для данного периода отсутствуют признаки значимой тенденции на снижение или увеличение ШГК. Данный факт позволяет выполнить ранговый корреляционный анализ между многолетними среднемесячными значениями

Т а б л и ц а 1

Коэффициент ранговой корреляции r_s между относительной влажностью воздуха за отдельные месяцы или периоды и шириной годичного кольца в географических культурах в лесостепи

Ranking correlation coefficient r_s between relative air humidity for individual months or periods and annual ring width in geographical crops in the forest-steppe

Климатип	Отдельный месяц или период	Коэффициент корреляции r_s	Уровень значимости p
Плесецкий	Август	0,88	<0,001
Сузунский	Август	0,82	<0,001
Богучанский	Август	0,81	<0,001
Чемальский	Июль–август	0,77	<0,01
Енисейский	Май–август	0,77	<0,01
Балгазынский	Август	0,74	<0,01

относительной влажности воздуха и реальными значениями ШГК. В результате проведенного анализа выявлены значимые коэффициенты ранговой корреляции Спирмена (r_s) (табл. 1).

Т а б л и ц а 2

Коэффициенты ранговой корреляции r_s между относительной влажностью воздуха за отдельные месяцы или периоды и долей поздней древесины в географических культурах в лесостепи

Ranking correlation coefficients r_s between relative air humidity for individual months or periods and the proportion of latewood in geographical crops in the forest-steppe

Климатип	Периоды, отдельные месяцы и их отношение	Коэффициент корреляции r_s	Уровень значимости p
Плесецкий	Август / апрель + май	0,46	<0,05
Сузунский	Август / апрель + май	0,64	<0,001
Богучанский	Август / апрель + май	0,73	<0,001
Чемальский	Август / апрель	0,54	<0,01
Енисейский	Май + июль + август + сентябрь	0,50	<0,01
Балгазынский	Август / апрель	0,52	<0,01

Как следует из табл. 1, енисейский климатип имеет высокий коэффициент корреляции между ШГК и относительной влажностью воздуха за более продолжительный период — с мая по август по сравнению с другими климатипами, имеющими высокие и значимые связи с одним или двумя месяцами во второй половине вегетационного периода, как в случае с чемальским климатипом. Предполагается, что повышение влажности в первой половине вегетационного периода (май — июнь) способствуют формированию крупных клеток с увеличенным радиальным размером трахеид у енисейского климатипа, что значительно сказывается на увеличении ШГК.

В то же время тенденция к раннему началу вегетационного периода у енисейского климатипа представляется одной из причин его низких показателей сохранности и роста в высоту в раннем возрасте [32]. В 30-летнем возрасте енисейский климатип уступает по сохранности контрольному сузунскому климатипу — на 68 % [33], возможно вследствие морозобойных повреждений и риска обширной эмболии в начале вегетационного периода, когда формируются крупные клетки с тонкими стенками. Кроме того, это может касаться повреждений корневой системы. Енисейский климатип хорошо растет в условиях песчаной почвы [34], однако на суглинках лесостепи при перепадах температуры в начале вегетационного периода возникают серьезные повреждения клеток и тканей, в том числе и в корневой системе, вследствие большего содержания воды, которая при низких значениях температуры замерзает.

Балгазынский климатип, место происхождения которого связано с дерново-боровыми супесчаными почвами [35] и относительно более

теплыми климатическими условиями по сравнению с остальными климатипами, в возрасте 30 лет демонстрирует в лесостепи Новосибирской области превышение по росту высоту над енисейским на 30,7 %, уступая сузунскому климатипу менее 5 % [33]. В лесостепи Западного Забайкалья балгазынский климатип не уступает по приростам местному — заудинскому климатипу, уступая ему только 2,9 % по выживаемости [36]. Данные результаты показывают, что условия местопроисхождения влияют на период, с которым отмечается у потомства климатипов значимая корреляция с относительной влажностью воздуха. Ранние сроки начала вегетационного периода при перемещении потомства популяций сосны обыкновенной в более теплые условия, но с вероятностью возникновения заморозков, могут способствовать снижению сохранности потомства, по причине раннего начала формирования трахеид, имеющих такие анатомические особенности, как большие просветы и тонкие клеточные стенки в ранней древесине. В южной тайге было установлено, что енисейский климатип в ранней древесине имеет среднее значение радиального диаметра трахеид ($38,4 \pm 0,32$) мкм, тогда как у балгазынского он ниже — ($33,6 \pm 0,46$) мкм [37]. Низкие значения радиального диаметра, а следовательно, и просвета клеток в начале вегетационного периода, могут способствовать устойчивости к резкому возникновению заморозков.

Коэффициенты корреляции между относительной влажностью воздуха и долей поздней древесины у климатипов представлены в табл. 2. Положительное влияние относительной влажности воздуха в августе и ее отрицательное влияние в апреле, либо апреле и мае, отмечается у пяти из шести исследуемых климатипов.

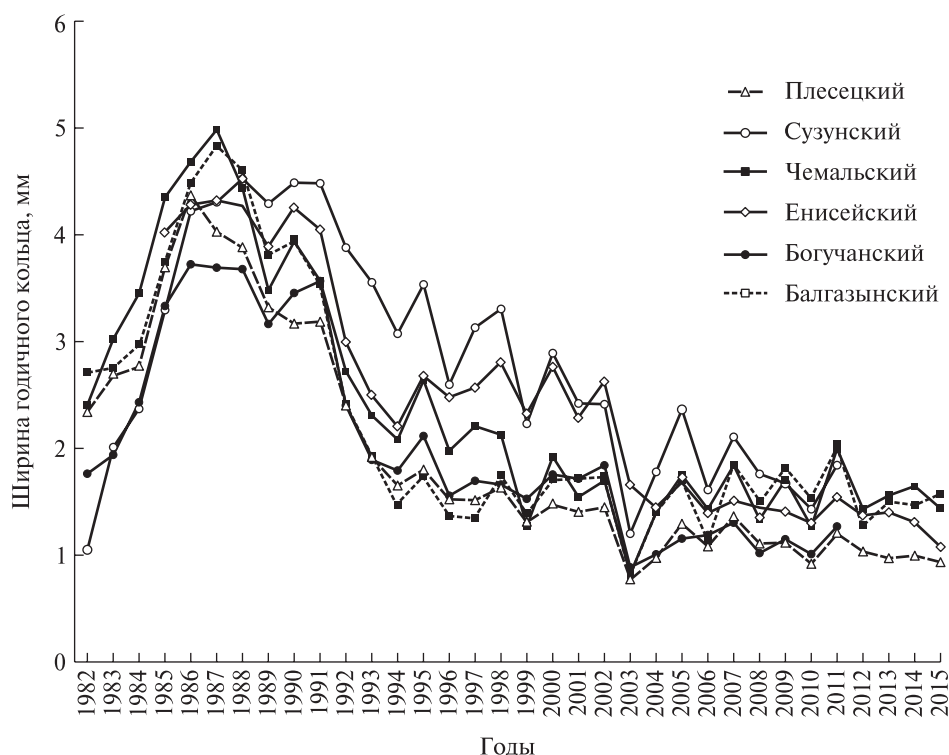


Рис. 2. Средняя динамика ширины годичного кольца у шести климатипов в географических культурах в южной тайге с 1982 по 2015 гг.

Fig. 2. Average annual ring width dynamics in six climatypes in geographical crops in the southern taiga from 1982 to 2015

Только у енисейского климатипа зафиксировано положительное влияние относительной влажности воздуха мая и июля на долю поздней древесины. Таким образом, у потомства этого климатипа такое положительное влияние в первой половине вегетационного периода свидетельствует о более раннем переходе к формированию поздней древесины. Увеличение ШГК связано с формированием клеток, имеющих сниженный радиальный размер просвета и более широкие клеточные стенки, поэтому по своим характеристикам их можно отнести к поздним трахеидам.

В географических культурах в южной тайге после относительной стабилизации радиальных приростов в возрасте культур 20...35 лет фиксируются годы с резким падением ШГК, в частности 1999 и 2003 г. В 2003 г. отмечен наибольший спад, причем у некоторых климатипов он совпал с минимальным значением ШГК. На данном возрастном этапе у сосны обыкновенной этих климатипов характер динамики ШГК носит ступенчатый характер с тенденцией к постепенному уменьшению, без возвращения к прежнему уровню. Общая динамика радиального прироста с возрастом у некоторых климатипов имеет значимую тенденцию к снижению (рис. 2).

Относительная влажность воздуха в 2003 г. имела низкие значения: в мае — 49 %, в июне — 54 %. Падение радиального прироста с 2002 г. по 2003 г. составило 37...54 %. При этом для лесостепи по относительной влажности воздуха были отмечены схожие значения, однако резкое снижение динамики радиального прироста не зафиксировано (табл. 3).

Сравнительный индивидуальный анализ климатипов сосны показал неоднозначный характер динамики ШГК. Так, в южной тайге у контрольного богучанского климатипа в период с 20 до 35 лет фиксируется тенденция к снижению ШГК ($y = -0,0458x + 1,7485$; $R^2 = 0,48$), вызванная разделением на два периода — до 2003 г. (со значениями выше 1,5 мм) и после (со значениями ниже 1,3 мм). Спад радиального прироста с 2002 г. по 2003 г. составил 52 %. У сузунского климатипа в период с 20 до 35 лет отмечается тенденция к снижению ШГК ($y = -0,0952x + 2,9826$; $R^2 = 0,55$) и резкий спад прироста — 50 %. Плесецкий климатип в период с 20 до 39 лет имеет тенденцию к снижению ШГК ($y = -0,0305x + 1,5267$; $R^2 = 0,54$), а спад составил 47 %. Балгазынский климатип в исследуемый период не имеет ни положительной, ни отрицательной тенденции по ШГК.

Т а б л и ц а 3

**Темпы развития радиального прироста (ширина годичного кольца, мм)
и восстановление после резкого спада в 2003 г. в условиях южной тайги**

**Rates of radial growth (tree-ring width, mm) and recovery
after a sharp decline in 2003 in the southern taiga**

Климатип	Высокие приросты в 1985– 1991 гг.	Спад в 1992– 1995 гг.	Перед резким спадом (1996– 2002 гг.)	ШГК, мм	Спад, %	После 2003 г.	Максимальное превышение над 2003 г.	
							%	год
Плесецкий	3,67	1,94	1,48	0,78	47	1,08	76	2007
Сузунский	4,23	3,51	2,71	1,20	50	1,82	98	2005
Богучанский	3,52	2,05	1,68	0,89	52	1,14	46	2007
Чемальский	4,21	2,44	1,82	0,82	51	1,57	144	2011
Енисейский	4,16	2,60	2,55	1,66	37	1,41	1	2005
Балгазынский	4,13	1,88	1,57	0,79	54	1,56	157	2011

($y = 0,0056x + 1,4662$; $R^2 = 0,01$), при этом спад в 2003 г. составил 54 %. Спад радиального прироста у чемальского климатипа составил 51 %, причем он не имеет значимой отрицательной тенденции по ШГК ($y = -0,0183x + 1,8113$; $R^2 = 0,10$). Заметная тенденция к снижению ШГК ($y = -0,0852x + 2,7145$; $R^2 = 0,77$) выявлена у енисейского климатипа, при этом спад составил 37 %.

Полученные данные (см. табл. 3) показывают, что чемальский и балгазынский климатипы после минимального значения ШГК в 2003 г. демонстрируют успешное восстановление показателей ШГК, значительно превышающих этот минимум. Енисейский климатип отличается устойчивой тенденцией к снижению ШГК, при отсутствии восстановления фиксированных ранее относительно высоких показателей ШГК. В ходе анализа выявлено, что южные по происхождению климатипы из горно-таежных областей (балгазынский и чемальский) лучше адаптируются к засушливым условиям по сравнению с остальными климатипами.

В связи с тем, что балгазынский климатип не имеет выраженной тенденции радиального прироста с 17-летнего возраста, для него корреляция относительной влажности воздуха проводилась с реальными значениями, для остальных климатипов была проведена индексация ШГК с помощью полинома третьей степени (табл. 4).

Таким образом, корреляционный анализ ШГК и относительной влажностью воздуха в условиях южной тайги показал единообразие значимой связи у климатипов сосны обыкновенной в первой половине вегетационного периода. В отличие от условий лесостепи, в южной тайге ШГК не увеличивается за счет повышения влажности в августе, поскольку

Т а б л и ц а 4

**Коэффициент ранговой корреляции r_s
относительной влажности воздуха
за май — июнь и ширины годичного
кольца в географических культурах
в южной тайге**

**Ranking correlation coefficient r_s between
relative air humidity for May–June
and tree-ring width in geographic crops
in the southern taiga**

Климатип	Коэффициент корреляции r_s	Уровень значимости p	Густота древостоя, шт./га
Плесецкий	0,62	<0,01	4444
Сузунский	0,63	<0,01	1508
Богучанский	0,76	<0,001	3064
Чемальский	0,62	<0,01	1282
Енисейский	0,56	<0,01	2076
Балгазынский	0,78	<0,001	3044

новые клетки к этому времени перестают продуцироваться.

Выполнен расчет коэффициентов ранговой корреляции между относительной влажностью воздуха и долей поздней древесины у климатипов в южной тайге (табл. 5). Значимые коэффициенты корреляции доли поздней древесины с определенными периодами показывают, что влияние относительной влажности воздуха на итоговое значение доли поздней древесины изменяется от месяца к месяцу.

Для сузунского, чемальского и балгазынского климатипов отмечаются максимальные значения коэффициента корреляции с одним и тем же отношением средней относительной влажности воздуха в мае и августе к относительной

Т а б л и ц а 5

Коэффициент ранговой корреляции r_s относительной влажности воздуха за отдельные месяцы или периоды и доли поздней древесины в географических культурах в южной тайге

Ranking correlation coefficient r_s between relative air humidity for individual months or periods and the proportion of latewood in geographic crops in the southern taiga

Климатип	Периоды, отдельные месяцы и их отношение	Коэффициент корреляции r_s	Уровень значимости p
Плесецкий	Май + август / апрель + июнь + сентябрь	0,60	<0,001
Сузунский	Май + август / апрель + июнь	0,82	<0,001
Богучанский	Апрель + июнь + сентябрь	-0,41	<0,05
Чемальский	Май + август / апрель + июнь	0,48	<0,01
Енисейский	Октябрь / сентябрь	0,50	<0,01
Балгазынский	Май + август / апрель + июнь	0,59	<0,001

влажности в апреле и июне. Положительное влияние мая и августа связано с тем, что именно в эти месяцы клетки ксилемы находятся на стадии утолщения клеточных стенок и высокие значения относительной влажности воздуха способствуют формированию более толстой клеточной стенки. Низкие значения относительной влажности воздуха в апреле и июне, наоборот, приходятся на другие стадии — образование самих клеток и их радиальное растяжение. При низких значениях относительной влажности воздуха в этот период снижаются число клеток, образованных в первой половине вегетационного периода, и их радиальное растяжение, что, в общем, способствует увеличению доли поздней древесины.

Для плесецкого климатипа дополнительно отмечено влияние погодных условий сентября, объясняемое тем, что в это время возможно растяжение клеток, которое в случаях отсутствия четкого сформированного перехода к поздней древесине, способствует снижению доли поздней древесины при итоговой оценке. Этот факт совпадает с ранее полученными данными о том, что северные климатипы имеют тенденцию к более позднему снижению радиальных размеров трахеид в годичном кольце, по сравнению с южными [37].

Для местного богучанского климатипа максимум коэффициента корреляции между относительной влажностью воздуха и долей поздней древесины отмечается для средних значений за апрель, июнь и сентябрь. Отсутствие корреляции с маем и августом позволяет предположить, что в это время толщина клеточных стенок увеличивается, что не обеспечивает такой значимый эффект для доли поздней древесины, как процессы, связанные с формированием новых клеток ксилемы и их растяжением, которые

характерны для апреля, июня и сентября, или зависят от относительной влажности воздуха в эти месяцы. Чем выше относительная влажность воздуха в эти месяцы, тем ниже доля поздней древесины.

Енисейский климатип, у которого отмечается значимая корреляция ШГК и отношения относительной влажности воздуха октября месяца к ее значению сентября существенно отличается от остальных. Если предположить, что формирование ксилемы у этого климатипа происходит не только в сентябре, но и в октябре, когда высокая относительная влажность воздуха, то фиксируется ее положительное влияние на увеличение толщины клеточных стенок. В южной тайге енисейский климатип имеет существенно более низкое значение доли поздней древесины по сравнению с остальными климатипами [31], поскольку внушительное снижение радиального просвета трахеид и увеличение толщины их клеточных стенок у этого климатипа отмечается на более поздних этапах формирования годичного кольца.

Длительное формирование относительно крупных просветов трахеид у енисейского климатипа в годичном кольце происходит в результате проявления реакции на господствующие условия в пункте испытания. В южной тайге этот климатип в меньшей степени, чем другие сравниваемые климатипы, способен испытывать дефицит влаги, что подтверждается результатами опытов по потере массы хвои, собранной с потомства енисейского климатипа, тестируемого в условиях экспериментального хозяйства «Погорельский бор». Одним из механизмов устойчивости енисейского климатипа к потере влаги служит низкий темп потери хвоей своей массы при высушивании [38].

По результатам исследования выявлено, что климатические условия оказывают существенное влияние на характер отклика ШГК в различных условиях испытания. В южной тайге ШГК зависит от погоды в первой половине вегетационного периода, тогда как в условиях лесостепи погодные условия августа оказывают более значимое влияние, подтверждая, что в более теплых условиях лесостепи вегетационный период длится дольше, что способствует увеличению годичного радиального прироста.

Выводы

Между одноименными климатипами сосны обыкновенной, тестируемыми в географических культурах в лесостепи и южной тайге отмечаются различия по динамике ширины годичного кольца и характеру отклика на показатели относительной влажности воздуха. В условиях лесостепи все исследуемые климатипы достигают относительной стабилизации радиального прироста к 20-летнему возрасту географических культур, в южной тайге относительная стабилизация прироста к этому времени отмечается только у самого южного из исследуемых климатипов — балгазынского из Тывы.

Среднемесячная относительная влажность воздуха августа в условиях лесостепи оказывает значимое влияние на ширину годичных колец, в южной тайге у всех климатипов значимое влияние относительной влажности воздуха связано со среднемесячными показателями мая и июня. Эти результаты показывают, что в более теплых условиях лесостепи влияние погодных условий на ширину годичных колец продолжает сохраняться во второй половине вегетационного периода.

В южной тайге погодные условия в 20–30-летнем возрасте географических культур оказывают определяющее влияние на характер динамики ширины годичного кольца, что выражается в наличии резких спадов прироста и ступенчатом характере постепенного снижения темпов радиального прироста.

Работа выполнена в рамках базового проекта «Биоразнообразие лесов Сибири: эколого-динамический, генетико-селекционный, физико-химический и ресурсно-технологический аспекты» (FWES-2024-0028).

Список литературы

- [1] Мушинская О.А., Рябинина З.Н., Мушинская Н.И. Транспирация как составная часть водного режима растений и ее изучение у видов рода *Populus* L. // Вестник Оренбургского государственного университета, 2007. № 6. С. 95–99.
- [2] Jing M., Zhu L., Cherubini P., Yuan D., Li Z., Wang X., Liu S. Responses of radial growth of *Pinus massoniana* and *Castanopsis eyrei* to climate change at different elevations in south China // Ecological Indicators, 2022, v. 145, article 109602. DOI: 10.1016/j.ecolind.2022.109602
- [3] Wang A., Gao X., Zhou Z., Yang H., Zhao X., Wang Y., Li M., Zhao X. Dynamics responses of tree-ring growth to drought over Loess Plateau in the past three decades // Ecological Indicators, 2022, v. 143, article 109423. DOI: 10.1016/j.ecolind.2022.109423
- [4] Li J., Peng J., Wei X., Peng M., Li X., Liu Y., Li J. Stability assessment of tree ring growth of *Pinus armandii* Franch in response to climate change based on slope directions at the Lubanling in the Funiu Mountains, China // J. of Forestry Research, 2024, v. 35, article 44. DOI: 10.1007/s11676-024-01698-7
- [5] Li J., Peng K., Wei X., Liu Y., Li J., Peng M., Li X., Zhang K., Peng J. May–June relative humidity variation recorded by tree ring width of *Pinus armandii* Franch since 1863 in the Funiu Mountains, central China // Quaternary International, 2024, v. 696, pp. 38–49. DOI: 10.1016/j.quaint.2024.04.004.
- [6] Ge M., Wang W., Ruan H., Wang G., Zhang S., Yu S. Dynamics of CO₂ fluxes and environmental responses in a *Poplar* plantation // Frontiers in Environmental Science, 2024, v. 12. DOI: 10.3389/fenvs.2024.1443779
- [7] Wang H., Zhang Y., Xiao C., Shi S., Xu J., Meadows M.E., Shi J. Seasonal relative humidity recorded in tree-ring earlywood and latewood $\delta^{18}\text{O}$ in the West Tianmu Mountains, southeastern China // Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2024, v. 655, article 112551. DOI: 10.1016/j.palaeo.2024.112551
- [8] Talbott L.D., Rahveh E., Zeiger E. Relative humidity is a key factor in the acclimation of the stomatal response to CO₂ // J. of Experimental Botany, 2003, v. 54, iss. 390, pp. 2141–2147. DOI: 10.1093/jxb/erg215
- [9] Kont A., Jaagus J., Aunap R. Climate change scenarios and the effect of sea-level rise for Estonia // Global and Planetary Change, 2003, v. 36, pp. 1–15. DOI: 10.1016/S0921-8181(02)00149-2
- [10] Jasińska A.K., Alber M., Tullus A., Rahi M., Sellin A. Impact of elevated atmospheric humidity on anatomical and hydraulic traits of xylem in hybrid aspen // Functional Plant Biology, 2015, v. 42, no. 6, pp. 565–578. DOI: 10.1071/FP14224
- [11] Sellin A., Tullus A., Niglas A., Õunapuu E., Karusion A., Lõhmus K. Humidity-driven changes in growth rate, photosynthetic capacity, hydraulic properties and other functional traits in silver birch (*Betula pendula*) // Ecological Research, 2013, v. 28, iss. 3, pp. 523–535. DOI: 10.1007/s11284-013-1041-1
- [12] Rehschuh R., Cecilia A., Zuber M., Faragó T., Baumbach T., Hartmann H., Jansen S., Mayr S., Ruehr N. Drought-induces xylem embolism limits the recovery of leaf gas exchange in Scots pine // Plant Physiology, 2020, v. 184, iss. 2, pp. 852–864. DOI: 10.1104/pp.20.00407
- [13] Kiorapostolou N., Camarero J.J., Carrer M., Sterck F., Brigita B., Sangüesa-Barreda G., Petit G. Scots pine trees react to drought by increasing xylem and phloem conductivities // Tree Physiology, 2020, v. 40, iss. 6, pp. 774–781. DOI: 10.1093/treephys/tpaa033

- [14] Cairns D.M. Patterns of winter desiccation in krummholz forms of *Abies lasiocarpa* at treeline sites in Glacier National Park, Montana, USA // *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 2001, v. 83, iss. 3, pp. 157–168. DOI: 10.1111/j.0435-3676.2001.00151.x
- [15] Jankowski A., Wyka T.P., Żytkowiak R., Nihlgård B., Reich P.B., Oleksyn J. Cold adaptation drives variability in needle structure and anatomy in *Pinus sylvestris* L. along a 1,900 km temperate-boreal transect // *Functional Ecology*, 2017, v. 31, iss. 12, pp. 2212–2223. DOI: 10.1111/1365-2435.12946
- [16] Watanabe T., Matsuyama H., Kuzhevskaya I., Nechepurenko O., Chursin V., Zemtsov V. Long-term trends of extreme climate indexes in the southern part of Siberia in comparison with those of surrounding regions // *Atmosphere*, 2023, v. 14, iss. 7, article 1131. DOI: 10.3390/atmos14071131
- [17] Voropay N.N., Ryazanova A.A. Atmospheric droughts in Southern Siberia in the late 20th and early 21st centuries // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, v. 211, article 012062. DOI: 10.1088/1755-1315/211/1/012062
- [18] Alía R., Moro-Serrano J., Notivol E. Genetic variability of Scots pine (*Pinus sylvestris*) provenances in Spain: growth traits and survival // *Silva Fennica*, 2001, v. 35, no. 1, article id 601. DOI: 10.14214/sf.601
- [19] Hallingbäck H.R., Burton V., Vizcaino-Palomar N., Trotter F., Liziniwicz M., Marchi M., Berlin M., Ray D., Benito Garzón M. Managing uncertainty in Scots pine range-wide adaptation under climate change // *Frontiers in Ecology and Evolution*, 2021, v. 9, article 724051. DOI: 10.3389/fevo.2021.724051
- [20] Taeger S., Zang C., Liesebach M., Schneck V., Menzel A. Impact of climate and drought events on growth of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) provenances // *Forest Ecology and management*, 2013, v. 307, pp. 30–42. DOI: 10.1016/j.foreco.2013.06.053
- [21] Barzdajn W., Kowalkowski W., Chmura D.J. Variation in growth and survival among European provenances of *Pinus sylvestris* in a 30-year-old experiment // *Dendrobiology*, 2016, v. 75, pp. 67–77. DOI: 10.12657/denbio.075.007
- [22] Szaban J., Jelonek T., Okieńczyk A., Kowalkowski W. Results of a 57-year-long research on variability of wood density of the Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) from different provenances in Poland // *Forests*, 2023, v. 14, iss. 3, article 480. DOI: 10.3390/f14030480
- [23] Gülcü S., Bilir N. Growth and survival variation among Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) provenances // *International J. of Genomics*, 2017, article id 1904623. DOI: 10.1155/2017/1904623
- [24] Memišević Hodžić M., Bejtić S., Ballian D. Interaction between the effects of provenance genetic structure and habitat conditions on growth of Scots pine in international provenance tests in Bosnia and Herzegovina // *South-east European forestry*, 2020, v. 11, no. 1, pp. 11–16. DOI: 10.15177/see-for.20-03
- [25] Matyas C., Balazs P., Nagy L. Climatic stress test of Scots pine provenances in Northeastern Europe reveals high phenotypic plasticity and quasi-linear response to warming // *Forests*, 2023, v. 14, iss. 10, article 1950. DOI: 10.3390/f14101950
- [26] Веселов В.М., Прибыльская И.Р., Мирзеабасов О.А. Специализированные массивы для климатических исследований (ВНИИГМИ-МЦД). URL: <http://aisori-m.meteo.ru/waisori/index.xhtml?idata=18> (дата обращения 14.01.2025).
- [27] Кузнецова В.Н., Давлетшин С.Г., Швець Н.В. 2019. Описание базы данных «Среднемесячная относительная влажность воздуха на метеорологических станциях России». Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации — Мировой центр данных. URL: <http://meteo.ru/data/790-sredn> (дата обращения 14.01.2025).
- [28] Изучение имеющихся и создание новых географических культур: Программа и методика работ / под ред. Е.П. Проказина. Пушкино: Изд-во ВНИИЛМ, 1972. 52 с.
- [29] Наумова Н.Б., Макарикова Р.П., Тараканов В.В., Кузьмина Н.А., Новикова Т.Н., Милютин Л.И. Влияние климатических факторов на некоторые химические и микробиологические свойства почв // *Сибирский экологический журнал*, 2009, т. 16, № 2. С. 287–292. DOI: 10.1134/S1995425509020106
- [30] Кузьмин С.Р., Роговцев Р.В. Радиальный рост и доля поздней древесины у сосны обыкновенной в географических культурах Западной и Средней Сибири // *Сибирский лесной журнал*, 2016, № 6. С. 113–125. DOI: 10.15372/SJFS20160611
- [31] Кузьмин С.Р. Реакция ширины годичного кольца и доли поздней древесины у сосны обыкновенной на погодные условия в географических культурах // *ИзВУЗ Лесной журнал*, 2020, № 5. С. 64–80. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-5-64-80
- [32] Демиденко В.П., Алексеев Ю.Б., Урусов В.М. Географические культуры сосны и ели на юге Западной Сибири // *Лесное хозяйство*, 1984, № 3. С. 40–42.
- [33] Роговцев Р.В., Тараканов В.В., Ильичев Ю.Н. Продуктивность географических культур сосны в условиях среднеобского бора // *Лесное хозяйство*, 2008, № 2. С. 36–38.
- [34] Кузьмин С.Р. Динамика радиального роста сосны обыкновенной в географических культурах на дерново-подзолистой песчаной почве // *Хвойные бореальной зоны*, 2012, т. XXX, № 1–2. С. 106–110.
- [35] Тарасов П.А., Гайдукова А.Ф., Иванов В.А. Последопожарные изменения гидротермических параметров почв Балгазынского бора и проблемы его восстановления // *Хвойные бореальной зоны*, 2013, т. XXXI, № 5–6. С. 15–21.
- [36] Новикова Т.Н. Линейный прирост и дифференциация сибирских климатических сосны в географических культурах в Западном Забайкалье // *Хвойные бореальной зоны*, 2010, т. XXVII, № 1–2. С. 143–146.
- [37] Кузьмин С.Р., Ваганов Е.А., Кузьмина Н.А., Милютин Л.И. Особенности трахеид древесины у климатических *Pinus sylvestris* (*Pinaceae*) в географических культурах // *Ботанический журнал*, 2008, т. 93, № 1. С. 10–21.
- [38] Кузьмин С.Р., Карпюк Т.В., Кузьмина Н.А. Динамика массы хвои у сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) разного происхождения при высушивании // *Ботаника и ботаники в меняющемся мире: Труды Междунар. науч. конф., посвященной 135-летию кафедры ботаники и 145-летию Томского государственного университета (Томск, 14–16 ноября 2023 г.)*. Томск: Издательство Томского университета, 2023. С. 245–247.

Сведения об авторах

Кузьмин Сергей Рудольфович — д-р биол. наук, вед. науч. сотр. лаборатории лесной генетики и селекции, Институт леса имени В.Н. Сукачёва Сибирского отделения Российской академии наук (ИЛ СО РАН) — обособленное подразделение ФГБНУ ФИЦ КНЦ СО РАН, skr_7@mail.ru

Кузьмина Нина Алексеевна — канд. биол. наук, ст. науч. сотр. лаборатории лесной генетики и селекции, Институт леса имени В.Н. Сукачёва Сибирского отделения Российской академии наук (ИЛ СО РАН) — обособленное подразделение ФГБНУ ФИЦ КНЦ СО РАН, kuz@ksc.krasn.ru

Поступила в редакцию 07.04.2025.

Одобрено после рецензирования 16.07.2025.

Принята к публикации 25.07.2025.

ASSESSMENT OF SCOTS PINE (*PINUS SYLVESTRIS* L.) ANNUAL TREE RING STRUCTURE RESPONSE TO AIR RELATIVE HUMIDITY

S.R. Kuz'min[✉], N.A. Kuz'mina

Sukachev Institute of Forest SB RAS — Separate Division of FRC KSC SB RAS, build. 28, Akademgorodok no. 50, 660036, Krasnoyarsk, Russia

skr_7@mail.ru

Correlation analysis methods were used to evaluate the effect of relative humidity on the width of annual rings and the proportion of late wood in Scots pine climatotypes of different geographical origin tested in the forest-steppe of the Novosibirsk Region and the southern taiga of the Krasnoyarsk Territory. The most significant correlations of wood structure features with relative humidity over certain periods based on average monthly data have been identified and shown. The main differences between climatotypes have been identified in terms of the dynamics of the annual ring width, the relationship of the wood structure with certain time intervals during the growing season. Despite the same age of reaching the maxima of the annual ring width in the forest-steppe, differences between climatotypes in correlations with relative humidity were revealed in these conditions. In the southern taiga, on the contrary, with the equally significant influence of relative humidity from May and June on the width of the annual ring, there is a different character of its dynamics, which is expressed not only in different maxima of growth, but also in the different nature of the radial growth recovery after the dry conditions in 2003.

Keywords: provenance trial, climate, air relative humidity, adaptation, tree ring width, weather response

Suggested citation: Kuz'min S.R., Kuz'mina N.A. *Otsenka struktury godichnogo kol'tsa u sosny obyknovennoy (Pinus sylvestris L.) v zavisimosti ot otnositel'noy vlazhnosti vozdukh* [Assessment of Scots pine annual tree ring structure response to air relative humidity]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2025, vol. 29, no. 5, pp. 86–97. DOI: 10.18698/2542-1468-2025-5-86-97

References

- [1] Mushinskaya O.A., Ryabinina Z.N., Mushinskaya N.I. *Transpiratsiya kak sostavnaya chast' vodnogo rezhima rasteniy i ee izuchenie u vidov roda Populus L.* [Transpiration as an integral part of the aquatic regime of plants and its study in species of the genus *Populus* L.]. *Vestnik OGU [Vestnik of OSU]*, 2007, no. 6, pp. 95–99.
- [2] Jing M., Zhu L., Cherubini P., Yuan D., Li Z., Wang X., Liu S. Responses of radial growth of *Pinus massoniana* and *Castanopsis eyrei* to climate change at different elevations in south China. *Ecological Indicators*, 2022, v. 145, article 109602. DOI: 10.1016/j.ecolind.2022.109602
- [3] Wang A., Gao X., Zhou Z., Yang H., Zhao X., Wang Y., Li M., Zhao X. Dynamics responses of tree-ring growth to drought over Loess Plateau in the past three decades. *Ecological Indicators*, 2022, v. 143, article 109423. DOI: 10.1016/j.ecolind.2022.109423
- [4] Li J., Peng J., Wei X., Peng M., Li X., Liu Y., Li J. Stability assessment of tree ring growth of *Pinus armandii* Franch in response to climate change based on slope directions at the Lubanling in the Funiu Mountains, China. *J. of Forestry Research*, 2024, v. 35, article 44. DOI: 10.1007/s11676-024-01698-7
- [5] Li J., Peng K., Wei X., Liu Y., Li J., Peng M., Li X., Zhang K., Peng J. May–June relative humidity variation recorded by tree ring width of *Pinus armandii* Franch since 1863 in the Funiu Mountains, central China. *Quaternary International*, 2024, v. 696, pp. 38–49. DOI: 10.1016/j.quaint.2024.04.004.

- [6] Ge M., Wang W., Ruan H., Wang G., Zhang S., Yu S. Dynamics of CO₂ fluxes and environmental responses in a *Poplar* plantation. *Frontiers in Environmental Science*, 2024, v. 12. DOI: 10.3389/fenvs.2024.1443779
- [7] Wang H., Zhang Y., Xiao C., Shi S., Xu J., Meadows M.E., Shi J. Seasonal relative humidity recorded in tree-ring earlywood and latewood $\delta^{18}\text{O}$ in the West Tianmu Mountains, southeastern China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2024, v. 655, article 112551. DOI: 10.1016/j.palaeo.2024.112551
- [8] Talbott L.D., Rahveh E., Zeiger E. Relative humidity is a key factor in the acclimation of the stomatal response to CO₂. *J. of Experimental Botany*, 2003, v. 54, iss. 390, pp. 2141–2147. DOI: 10.1093/jxb/erg215
- [9] Kont A., Jaagus J., Aunap R. Climate change scenarios and the effect of sea-level rise for Estonia. *Global and Planetary Change*, 2003, v. 36, pp. 1–15. DOI: 10.1016/S0921-8181(02)00149-2
- [10] Jasińska A.K., Alber M., Tullus A., Rahi M., Sellin A. Impact of elevated atmospheric humidity on anatomical and hydraulic traits of xylem in hybrid aspen. *Functional Plant Biology*, 2015, v. 42, no. 6, pp. 565–578. DOI: 10.1071/FP14224
- [11] Sellin A., Tullus A., Niglas A., Õunapuu E., Karusion A., Lõhmus K. Humidity-driven changes in growth rate, photosynthetic capacity, hydraulic properties and other functional traits in silver birch (*Betula pendula*). *Ecological Research*, 2013, v. 28, iss. 3, pp. 523–535. DOI: 10.1007/s11284-013-1041-1
- [12] Rehschuh R., Cecilia A., Zuber M., Faragó T., Baumbach T., Hartmann H., Jansen S., Mayr S., Ruehr N. Drought-induced xylem embolism limits the recovery of leaf gas exchange in Scots pine. *Plant Physiology*, 2020, v. 184, iss. 2, pp. 852–864. DOI: 10.1104/pp.20.00407
- [13] Kiorapostolou N., Camarero J.J., Carrer M., Sterck F., Brigita B., Sangüesa-Barreda G., Petit G. Scots pine trees react to drought by increasing xylem and phloem conductivities. *Tree Physiology*, 2020, v. 40, iss. 6, pp. 774–781. DOI: 10.1093/treephys/tpaa033
- [14] Cairns D.M. Patterns of winter desiccation in krummholz forms of *Abies lasiocarpa* at treeline sites in Glacier National Park, Montana, USA. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 2001, v. 83, iss. 3, pp. 157–168. DOI: 10.1111/j.0435-3676.2001.00151.x
- [15] Jankowski A., Wyka T.P., Żytkowiak R., Nihlgård B., Reich P.B., Oleksyn J. Cold adaptation drives variability in needle structure and anatomy in *Pinus sylvestris* L. along a 1,900 km temperate-boreal transect. *Functional Ecology*, 2017, v. 31, iss. 12, pp. 2212–2223. DOI: 10.1111/1365-2435.12946
- [16] Watanabe T., Matsuyama H., Kuzhevskaya I., Nechepurenko O., Chursin V., Zemtsov V. Long-term trends of extreme climate indexes in the southern part of Siberia in comparison with those of surrounding regions. *Atmosphere*, 2023, v. 14, iss. 7, article 1131. DOI: 10.3390/atmos14071131
- [17] Voropay N.N., Ryazanova A.A. Atmospheric droughts in Southern Siberia in the late 20th and early 21st centuries. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, v. 211, article 012062. DOI: 10.1088/1755-1315/211/1/012062
- [18] Alía R., Moro-Serrano J., Notivol E. Genetic variability of Scots pine (*Pinus sylvestris*) provenances in Spain: growth traits and survival. *Silva Fennica*, 2001, v. 35, no. 1, article id 601. DOI: 10.14214/sf.601
- [19] Hallingbäck H.R., Burton V., Vizcaino-Palomar N., Trotter F., Liziniewicz M., Marchi M., Berlin M., Ray D., Benito Garzón M. Managing uncertainty in Scots pine range-wide adaptation under climate change. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 2021, v. 9, article 724051. DOI: 10.3389/fevo.2021.724051
- [20] Taeger S., Zang C., Liesebach M., Schneck V., Menzel A. Impact of climate and drought events on growth of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) provenances. *Forest Ecology and management*, 2013, v. 307, pp. 30–42. DOI: 10.1016/j.foreco.2013.06.053
- [21] Barzdajn W., Kowalkowski W., Chmura D.J. Variation in growth and survival among European provenances of *Pinus sylvestris* in a 30-year-old experiment. *Dendrobiology*, 2016, v. 75, pp. 67–77. DOI: 10.12657/denbio.075.007
- [22] Szaban J., Jelonek T., Okińczyc A., Kowalkowski W. Results of a 57-year-long research on variability of wood density of the Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) from different provenances in Poland. *Forests*, 2023, v. 14, iss. 3, article 480. DOI: 10.3390/f14030480
- [23] Gülcü S., Bilir N. Growth and survival variation among Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) provenances. *International J. of Genomics*, 2017, article id 1904623. DOI: 10.1155/2017/1904623
- [24] Memišević Hodžić M., Bejtović S., Ballian D. Interaction between the effects of provenance genetic structure and habitat conditions on growth of Scots pine in international provenance tests in Bosnia and Herzegovina. *South-east European forestry*, 2020, v. 11, no. 1, pp. 11–16. DOI: 10.15177/seefor.20-03
- [25] Matyas C., Balazs P., Nagy L. Climatic stress test of Scots pine provenances in Northeastern Europe reveals high phenotypic plasticity and quasi-linear response to warming. *Forests*, 2023, v. 14, iss. 10, article 1950. DOI: 10.3390/f14101950
- [26] Veselov V.M., Pribyl'skaya I.R., Mirzeabasov O.A. *Spetsializirovannyye massivy dlya klimaticheskikh issledovaniy (VNIIGMI-MTsD)* [Specialized arrays for climate research (RIHMI–WDC)]. Available at: <http://aisori-m.meteo.ru/waisori/index.xhtml?idata=18> (accessed 14.01.2025).
- [27] Kuznetsova V.N., Davletshin S.G., Shvets' N.V. *Opisanie bazy dannykh «Srednemesyachnaya otnositel'naya vlazhnost' vozdukh na meteorologicheskikh stantsiyakh Rossii»* [Description of the database «Average monthly relative humidity at meteorological stations in Russia»]. *Vserossiyskiy nauchno-issledovatel'skiy institut gidrometeorologicheskoy informatsii — Mirovoy tsentr dannykh* [The All-Russian Scientific Research Institute of Hydrometeorological Information is a global data center]. Available at: <http://meteo.ru/data/790-sredn> (accessed 14.01.2025).
- [28] *Izucheniye imeyushchikhsya i sozdaniye novykh geograficheskikh kul'tur: Programma i metodika rabot* [The study of existing and the creation of new provenance trials: A program and methodology of work]. Ed. E.P. Prokazin. Pushkino: VNIILM, 1972, pp. 52.

- [29] Naumova N.B., Makarikova R.P., Tarakanov V.V., Kuz'mina N.A., Novikova T.N., Milyutin L.I. *Vliyanie klimatipov sosny obyknovennoy na nekotorye khimicheskie i mikrobiologicheskie svoystva pochv* [Effect of climatypes of *Pinus sylvestris* on some chemical and microbiological properties of soil]. *Sibirskiy ekologicheskiy zhurnal* [Contemporary Problems of Ecology], 2009, v. 16, no. 2, pp. 287–292. DOI: 10.1134/S1995425509020106
- [30] Kuz'min S.R., Rogovtsev R.V. *Radial'nyy rost i dolya pozdney drevesiny u sosny obyknovennoy v geograficheskikh kul'turakh Zapadnoy i Sredney Sibiri* [Radial growth and percent of late wood in Scots pine in the provenance trials in Western and Central Siberia]. *Sibirskiy lesnoy zhurnal* [Siberian J. of Forest Science], 2016, no. 6, pp. 113–125. DOI: 10.15372/SJFS20160611
- [31] Kuz'min S.R. *Reaktsiya shiriny godichnogo kol'tsa i doli pozdney drevesiny u sosny obyknovennoy na pogodnye usloviya v geograficheskikh kul'turakh* [Response of Annual Ring Width and Latewood Content of Scots Pine to Weather Conditions in Provenance Trials]. *Russian Forestry Journal*, 2020, no. 5, pp. 64–80. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-5-64-80
- [32] Demidenko V.P., Alekseev Yu.B., Urusov V.M. *Geograficheskie kul'tury sosny i eli na yuge Zapadnoy Sibiri* [Provenance trials of pine and spruce in the south of Western Siberia]. *Lesnoe khozyaystvo* [Forestry Journal], 1984, no. 3, pp. 40–42.
- [33] Rogovtsev R.V., Tarakanov V.V., Il'ichev Yu.N. *Produktivnost' geograficheskikh kul'tur sosny v usloviyakh sredneobskogo bora* [Productivity of pine provenance trial plantation in conditions of sredneobsky forest]. *Lesnoe khozyaystvo* [Forestry Journal], 2008, no. 2, pp. 36–38.
- [34] Kuz'min, S.R. *Dinamika radial'nogo rosta sosny obyknovennoy v geograficheskikh kul'turakh na dernovo-podzolistoy peschanoy pochve* [Dynamics of radial growth of Scots pine in the provenance trial on sod-podzolic sandy soil]. *Khvoynye boreal'noy zony* [Conifers of the Boreal Area], 2012, v. XXX, no. 1–2, pp. 106–110.
- [35] Tarasov P.A., Gaydukova A.F., Ivanov V.A. *Poslepozharnye izmeneniya gidrotermicheskikh parametrov pochv Balgazynskogo bora i problemy ego vosstanovleniya* [Post-fire changes in the hydrothermal parameters of the soils of the Balgazynsky forest and the problems of its restoration]. *Khvoynye boreal'noy zony* [Conifers of the Boreal Area], 2013, v. XXXI, no. 5–6, pp. 15–21.
- [36] Novikova T.N. *Lineynyy prirost i differentsiatsiya sibirskikh klimatipov sosny v geograficheskikh kul'turakh v Zapadnom Zabaykal'e* [Linear growth and differentiation of Siberian pine climatypes in the provenance trial in Western Transbaikalia]. *Khvoynye boreal'noy zony* [Conifers of the Boreal Area], 2010, v. XXVII, no. 1–2, pp. 143–146.
- [37] Kuz'min S.R., Vaganov E.A., Kuz'mina N.A., Milyutin L.I. *Osobennosti trakheid drevesiny u klimatipov Pinus sylvestris (Pinaceae) v geograficheskikh kul'turakh* [Features of wood tracheids in *Pinus sylvestris* (Pinaceae) climatypes in the provenance trial]. *Botanicheskiy zhurnal* [Botanical J.], 2008, v. 93, no. 1, pp. 10–21.
- [38] Kuz'min S.R., Karpyuk T.V., Kuz'mina N.A. *Dinamika massy khvoi u sosny obyknovennoy (Pinus sylvestris L.) raznogo proiskhozhdeniya pri vysushivani* [Dynamics of the mass of needles of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) of different origin during drying]. *Botanika i botaniki v menyayushchemsya mire* [Elektronnoe izdanie]: Trudy Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii, posvyashchennoy 135-letiyu kafedry botaniki i 145-letiyu Tomskogo gosudarstvennogo universiteta [Botany and Botanists in changing world. [Electronic edition]: Proceedings of the International Scientific Conference dedicated to the 135th anniversary of the Department of Botany and the 145th anniversary of Tomsk State University (Tomsk, November 14–16, 2023). Tomsk: Tomsk State University Publ., 2023, pp. 245–247.

This work was carried out as part of the basic project «Biodiversity of Siberian Forests: Ecological-Dynamic, Genetic-Breeding, Physicochemical, and Resource-Technological Aspects» (FWES-2024-0028).

Authors' information

Kuz'min Sergey Rudol'fovich — Dr. Sci. (Biology), Principal Researcher of Laboratory of Forest Genetics and Breeding, Sukachev Institute of Forest SB RAS — Separate Division of Federal Research Center «Krasnoyarsk Science Center» of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, skr_7@mail.ru

Kuz'mina Nina Alekseevna — Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher of of Laboratory of Forest Genetics and Breeding, Sukachev Institute of Forest SB RAS — Separate Division of Federal Research Center «Krasnoyarsk Science Center» of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, kuz@ksc.krasn.ru

Received 07.04.2025.

Approved after review 16.07.2025.

Accepted for publication 25.07.2025.

Вклад авторов: все авторы в равной доле участвовали в написании статьи

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article

The authors declare that there is no conflict of interest