

ПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ И ДИНАМИКА ГЕОСИСТЕМ

УДК 582.475.1:551.583.4(470.13)

ДЕНДРОКЛИМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РАДИАЛЬНОГО ПРИРОСТА СОСНЫ (*Pinus sylvestris* L.) НА ЕВРОПЕЙСКОМ СЕВЕРО-ВОСТОКЕ РОССИИ

© 2022 г. И. Н. Кутявин^а, *, А. В. Манов^а

^аИнститут биологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, Россия

*e-mail: kutjavin-ivan@rambler.ru

Поступила в редакцию 26.07.2021 г.

После доработки 11.04.2022 г.

Принята к публикации 22.04.2022 г.

В статье приводятся результаты исследований климатического сигнала в радиальном приросте сосны обыкновенной, растущей на автоморфных и гидроморфных почвах европейского Северо-Востока России (Республика Коми). На 7 участках, располагающихся в разных подзонах тайги, отобраны образцы древесины (керны и спилы) для построения древесно-кольцевых хронологий сосны, с целью выявления связи ее прироста с параметрами климата. По данным инструментальных метеонаблюдений на исследуемой территории с начала 70-х годов XX столетия отмечается тенденция повышения температуры воздуха и суммы осадков, которые в широтном и долготном градиенте проявляются неодинаково. Статистический анализ связи климат/прирост показал, что основным фактором роста сосны северной тайги и в районе Северного Предуралья выступает температура мая, а в средней и южной тайге — температуры июля. Для сосняков северной тайги выявлена достоверная отрицательная связь ширины годовых колец деревьев с осадками мая и июля. Анализ корреляции индексов прироста со среднемесячными температурами воздуха и суммами месячных осадков в плавающем окне в диапазоне 25 лет показал неустойчивый сигнал за вегетационный период. Отмечено, что за последние 30 лет на европейском Северо-Востоке происходит ослабление климатического сигнала в радиальном приросте древесины, что, видимо, определяется адаптационными способностями сосны к благоприятным термическим условиям. Корреляция взаимоотношений индексированных хронологий со скользящими пятнадцатидневными значениями климатических значений показала, что в условиях средней и южной тайги в начале вегетационного периода положительная связь радиального прироста с температурой воздуха, при ее ослаблении, сменяется на положительную связь с осадками. Однако, такая особенность в северной тайге не проявляется. Здесь в большей степени на прирост сосны положительное влияние оказывает температура воздуха.

Ключевые слова: Север, тайга, дендроклиматология, сосна обыкновенная, радиальный прирост, древесно-кольцевая хронология, климат

DOI: 10.31857/S2587556622040070

Динамические процессы в сосняках происходят под воздействием ряда факторов, основным из которых выступает климат (Frits, 1976; Nikolaev et al., 2009). Во второй половине XX и начале XXI вв. отмечаются значительные изменения климата Земли (Climate ..., 2014; Mc Bean et al., 2005; и др.). Они ведут к изменению продукционных процессов лесных экосистем (Kullman, 2005; Sumichrast et al., 2020). Выявлено, что аномально высокие температуры воздуха в отдельные годы приводят к снижению продуктивности и устойчивости лесных сообществ (Bastos et al., 2014). Современное состояние изученности лесов в условиях климатической нестабильности нуждается в проведении постоянного мониторинга и обновления данных дендроклиматического анализа

(Бенькова и др., 2012; Ваганов и др., 1996; Кузнецова и др., 2020; Шиятов, 1986; Climate ..., 2013; Kullman, 2005; Nikolaev et al., 2009; и др.). Однако, большинство этих работ проведено в экстремальных для древесной растительности условиях, где климатический сигнал наиболее четко проявляется в приросте древесины. В сомкнутых естественно развивающихся древостоях рост деревьев лимитируется в большей степени орографическими и фитоценотическими факторами, чем климатическими (Комин, 1973; Малышева, Быков, 2011). По исследованиям лесов бореальной зоны (D'Arrigo et al., 2007), отмечено ослабление положительной связи между температурой и ростом деревьев, это позволяет предположить, что температура превысила физиологический порог

и в дальнейшем усложнит выявление отклика на изменение климата.

Насаждения сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) на территории Республики Коми занимают 7.1 млн га. Данный вид обладает высокой пластичностью, имеет широкий ареал (Рысин, Савельева, 2008). Массивы сосновых лесов приурочены в основном к борovým террасам крупных рек — Печоры, Вычегды, Мезени (Леса ..., 1999). На востоке республики в предгорьях Северного и на границе Приполярного Урала сосна формирует островные ареалы, произрастая на каменистых и торфяных почвах (Кутявин, 2018). На севере она заходит до полярного круга, достигая 66.5° с.ш. (Манов, 2014). Дендроклиматические исследования роста сосны на территории Республики Коми приведены в работах (Гурская и др., 2017; Манов, 2014; Drobyshev et al., 2004; Lopatin et al., 2008), но они носят локальный характер и не дают представления о закономерностях динамики ее прироста в связи с изменением климата в зональном аспекте.

Цель данной работы состоит в сравнительной оценке радиального прироста сосны обыкновенной с температурой воздуха и осадками на территории европейского Северо-Востока России, с учетом зональности.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Рельеф и климат. Климат территории европейского Северо-Востока России характеризуется относительной неоднородностью, что связано с

ее большой (1300 км) широтной протяженностью и разнообразием орографических элементов, а также с делением на Русскую платформу и горы Уральской страны. Так, здесь выделяются 5 крупных элементов рельефа: (1) Вычегодско-Мезенская равнина, (2) отроги Северных Увалов, (3) полосо Тиманского кряжа, (4) Уральский хребет — Полярный, Приполярный и Северный Урал, (5) Печорская низменность. Высоты над ур. м. от равнин до вершин гор Урала варьируют в среднем от 100 до 1880 м.

Густая речная сеть, обширные заболоченные территории и преобладание осадков над испарением обуславливают повышенную влажность этой территории. Территория Республики Коми подвержена влиянию арктических и умеренно-холодных воздушных масс. Среднегодовая температура с юга на север понижается от +1 до –6...–7°C. Самый теплый месяц — июль, самый холодный — январь. Осадки варьируют в различных частях республики от 600 до 850 мм. В предгорьях и горах Урала их количество может превышать 1000 мм. Продолжительность вегетационного периода от крайне северной до южной тайги изменяется от 130 до 177 дней¹ (Атлас ..., 1997).

Методы. Дендроклиматический анализ радиального прироста деревьев сосны обыкновенной

¹ Научно-прикладной справочник по климату СССР. Сер. 3. Многолетние данные. Ч. 1–6. Архангельская и Вологодская области, Коми АССР. Кн. 1. Л.: Гидрометиздат, 1989. Вып. 1. 484 с.

Таблица 1. Характеристика объектов исследования и статистические показатели древесно-кольцевых хронологий сосны

Район исследований	Условные обозначения района	Координаты точек	Метеостанция	Группа типов леса	<i>N</i>	<i>r</i>	Sens	Ar1
Инта	INT	66°04'26.6" с.ш.; 59°57'00.2" в.д.	Петрунь	Сфагновая	6	0.53	0.27	–0.040
Зеленоборск	ZLB	64°28'16.10" с.ш.; 55°19'37.60" в.д.	Ираель	Зеленомошная	34	0.58	0.22	0.060
Илыч	ILY	63°4'17.50" с.ш.; 58°36'1.70" в.д.	Троицко-Печорск	Сфагновая	9	0.54	0.25	0.060
Унья	UNA	61°32'31.03" с.ш.; 58°12'32.70" в.д.	Троицко-Печорск	Сфагновая	50	0.58	0.27	0.030
Печора	PECH	61°48'41.25" с.ш.; 57°35'8.21" в.д.	Троицко-Печорск	Зеленомошная, лишайниковая	120	0.60	0.27	–0.004
Сыктывкар	SYK	62°2'3.63" с.ш.; 50°28'34.00" в.д.	Сыктывкар	Лишайниковая	9	0.55	0.22	0.000
Койгородок	KOY	59°58'58.20" с.ш.; 50°9'24.90" в.д.	Объячево	Сфагновая	29	0.70	0.25	0.001

Примечание: *N* — количество индивидуальных хронологий, *r* — коэффициент корреляции между хронологиями, Sens — коэффициент чувствительности, Ar1 — автокорреляция первого порядка.

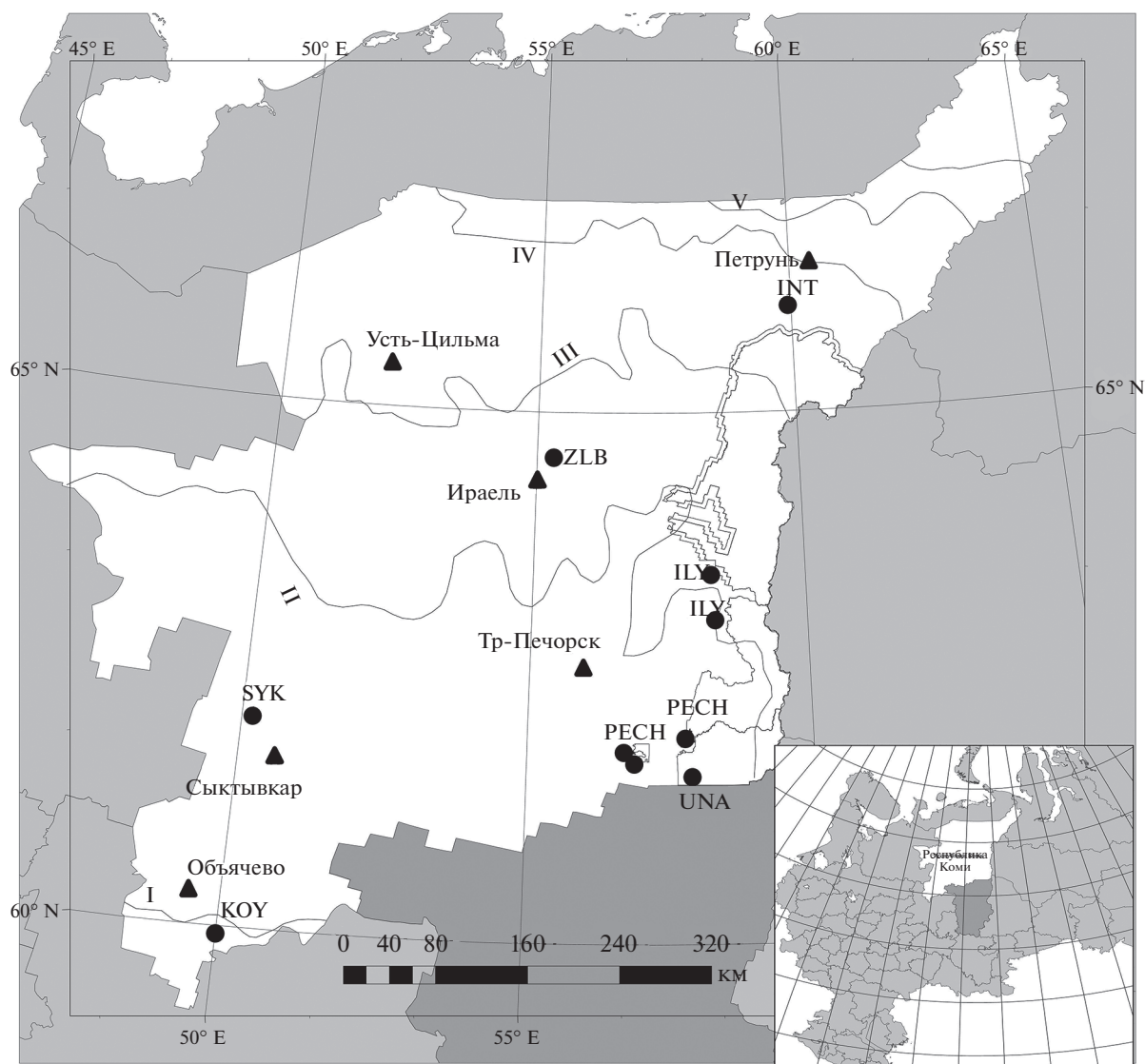


Рис. 1. Карта-схема расположения объектов исследования. Точки — районы отбора образцов древесины; треугольник — места расположения метеостанций; латинскими буквами указан код участков (см. расшифровку в табл. 1). Природные подзоны: I — южная тайга, II — средняя тайга, III — северная тайга, IV — крайнесеверная тайга, V — лесотундра, VI — тундра.

проведен в естественно развивающихся сосняках, расположенных на лесных стационарах Института биологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН. Отбор образцов проведен с дендрохронологических участков, которым присвоен короткий буквенный код, в подзонах: крайне северной (INT), северной (ZLB, ILY), средней (UNA, PECH, SYK) и южной (КОУ) тайги (рис. 1). Исследуемые сосновые фитоценозы развиваются на автоморфных подзолах, а также торфяных почвах и представлены лишайниковыми, зеленомошными и сфагновыми типами сообществ (табл. 1).

На каждом из участков сосняков отобраны с живой и мертвой древесины керны и спилы деревьев по методам, используемым в дендрохроно-

логии (Frits, 1971; Niklasson and Drakenberg, 2001). Образцы древесины брались на высоте от 0.2 до 0.5 м от коя для получения максимального возрастного ряда хронологий. Всего проанализировано 700 образцов древесины, отобранных с деревьев возрастом 100 лет и больше. Посредством программы COFESHA (Holmes, 1983) из них выбраны 258 образцов сосны, пригодных для дендроклиматического анализа (см. табл. 1). Исключение значительного количества образцов из анализа обусловлено индивидуальностью радиального прироста деревьев в сомкнутых разновозрастных древостоях. В относительно благоприятных почвенно-климатических условиях, лимитирующих ширину годичных колец факторы, мы полагаем, что

они могут меняться под действием конкурентных взаимоотношений между деревьями, тем самым уменьшая влияние климатических условий на их прирост. Ширина годичных колец измерялась под биноклем с точностью 0.01 мм с использованием полуавтоматического прибора LINTAB V и компьютерной программы TSAP Win (Rinn, 1996). Для снижения искажений влияния возрастных изменений, межвидовой конкуренции, условий места произрастания сосны, а также исключения влияния внешних катастрофических факторов (пожары), для расчета индексов прироста временных рядов использовали метод кубического сглаживания сплайна с окном две трети длины ряда в программной среде R в пакете dplR (Bunn, 2008). В связи с высокой автокорреляцией ширины годичных колец отдельные ряды индексов прироста были “выбелены” с применением модели авторегрессии. Остаточные “выбеленные” индексы прироста объединялись в общий ряд путем расчета средних взвешенных значений с использованием пакета dplR.

Индексированные древесно-кольцевые хронологии, полученные для каждой точки, в некоторых случаях объединялись из нескольких участков мест отбора образцов в один. Так, точка РЕСН была объединена из 8 участков сосняков, произрастающих на автоморфных почвах в одну. Тем самым получена одна хорошая согласованная хронология сосны длительностью 195 лет (см. рис. 1, 3).

Оценку пригодности полученного дендрохронологического материала проводили с использованием таких показателей, как коэффициент корреляции Пирсона (r), средний коэффициент чувствительности (Sens) и автокорреляция первого порядка (Ar_1), полученных в пакете dplR (см. табл. 1). За пороговую величину общего популяционного сигнала хронологии принято значение 0.85 (Wigley et al., 1984).

При помощи *bootstrap* метода с использованием программного пакета bootRes в среде R, была проведена оценка влияния климатических показателей на радиальный прирост сосны. Используемый метод ориентирован на получении значений коэффициентов множественной линейной регрессии климатических переменных каждого календарного месяца и их доверительный интервал (Zang and Biondi, 2013).

С целью выявления ключевых интервалов влияния на прирост сосны температуры воздуха и осадков использовался метод аналогии, предложенный В.Е. Беньковой с соавт. (2012). Для анализа рассчитаны корреляции индексов прироста со средней температурой и осадками в 15-дневном плавающем окне со сдвигом на 5 дней вперед. Рассматривается период с начала мая по конец сентября, в течение которого возможны су-

щественные реакции формирования ширины годичного кольца на климатические показатели.

Для оценки связи древесно-кольцевых хронологий с климатом использовались суточные данные пяти метеостанций² с длительным периодом непрерывных наблюдений, наиболее близко расположенных от объектов исследования (см. табл. 1).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Динамика многолетней среднегодовой температуры и суммы годовых осадков показывает выраженную тенденцию роста количества осадков и температуры воздуха на Северо-Востоке европейской части России. На территории Республики Коми среднегодовые значения метеопараметров имеют неоднородный характер (рис. 2). 70-летние метеонаблюдения на станции Петрунь (INT), расположенной в подзоне крайне северной тайги, показывают увеличение осадков на 220 мм. Температура приземного слоя воздуха за этот период здесь по сравнению с другими местами изменилась незначительно (тренд составляет 0.3°C/10 лет). По данным метеостанции Ираель (ZLB), расположенной в северной тайге, за последние 60 лет сумма среднегодовых осадков поднялась на 100 мм, среднегодовая температура — на 1°C. По данным метеостанций Троицко-Печорск и Сыктывкар (средняя тайга), среднегодовое количество осадков в западной точке SYK возросло на 200, на юго-восточной точке — РЕСН на 250 мм. Температура воздуха повысилась на 1–1.5°C. Увеличение температуры на 2°C отмечается в южной тайге (метеостанция Объячево (KOY)). Сумма осадков здесь возрастает на 100 мм.

Полученные коэффициенты корреляции остаточных древесно-кольцевых хронологий сосны, изменяясь от 0.53 до 0.7, показывают значительную тесноту связи между индивидуальными сериями измерений (см. табл. 1). Показатель чувствительности близкий к 0.3 и выше этого значения свидетельствует о достоверном проявлении климатического сигнала древесно-кольцевых хронологий (Шиятов, 1986). Полученные коэффициенты чувствительности изменяются в пределах 0.22–0.27. Самый низкий показатель (0.22) выявлен в средней тайге на точке (SYK). Из отобранных на этой точке 120 образцов, синхронность в радиальном приросте показали только 9.

Проведенный бутстреп-анализ влияния температуры воздуха за вегетационный период текущего года на прирост древесины сосны показал положительную достоверную связь с температурами мая на точках северной тайги (ZLB) и территории Северного Приуралья (ILY, РЕСН и UNA) (рис. 4). На двух участках (SYK, KOY), располо-

² <http://aisori-m.meteo.ru/waisori> (дата обращения 20.01.2021).

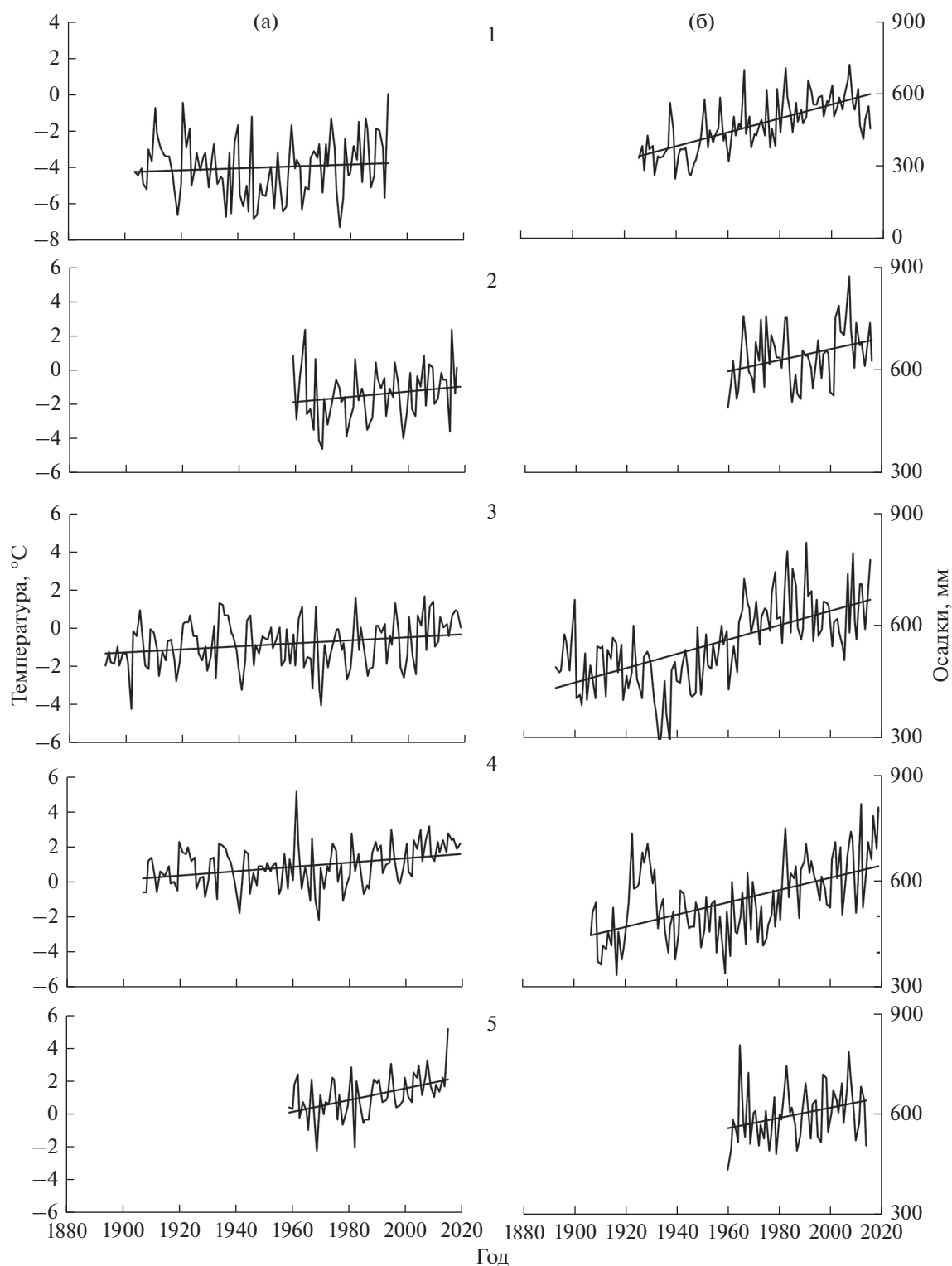


Рис. 2. Ход среднегодовой температуры воздуха (а) и суммы годовых осадков (б) по метеостанциям: 1 – Петрунь, 2 – Израель, 3 – Троицко-Печорск, 4 – Сыктывкар, 5 – Объячево.

женных в южных районах республики, в течение рассматриваемого календарного периода проявляется положительная достоверная связь ради-

ального прироста с температурой воздуха в июле. Наблюдения на самой северной точке (INT) показали отсутствие влияния температур на ради-

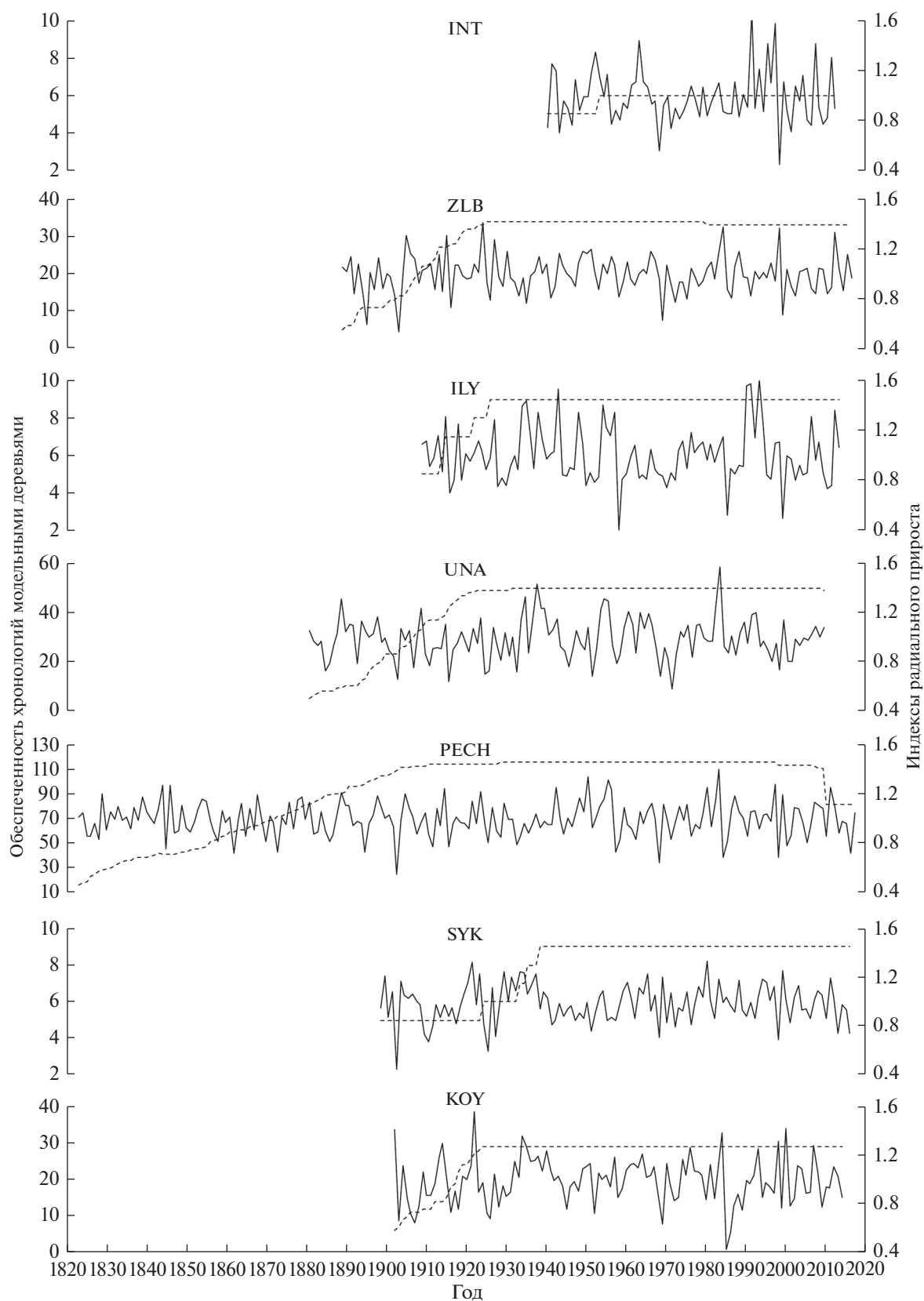


Рис. 3. Динамика индексированного радиального прироста сосны (коды участков см. в табл. 1).

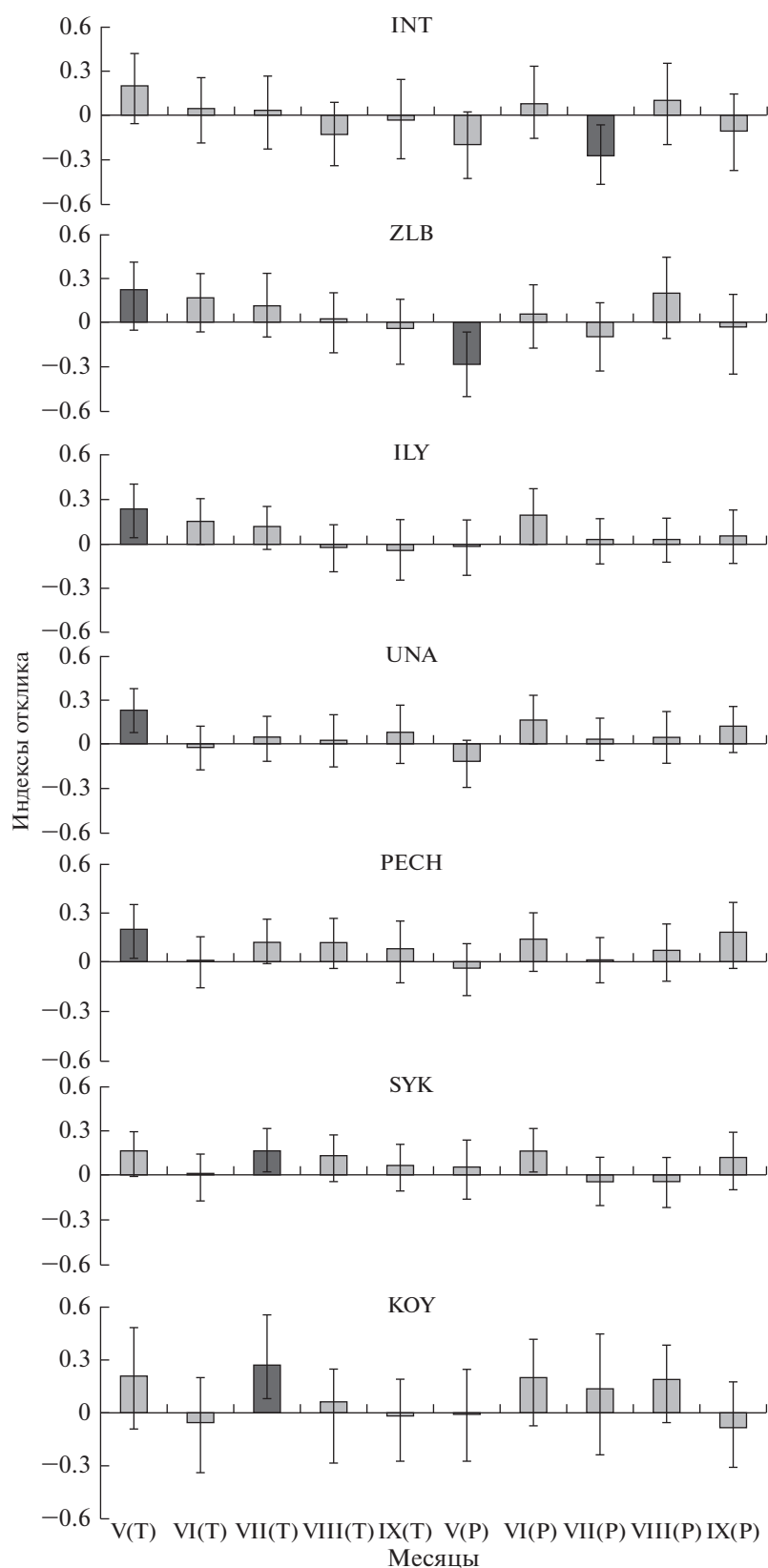


Рис. 4. Функции отклика индексов прироста сосны (регрессионные коэффициенты) со среднемесячными температурами воздуха (Т) и суммами месячных осадков (Р).

Примечание. Код участков см. в табл. 1. Темные столбики указывают на достоверные значения ($p \leq 0.05$).

альный прирост в течение всего вегетационного периода. Его отрицательная связь со среднемесячными осадками отмечается на двух северных точках (INT, ZLB). В сосняках багульниковых, расположенных на территории крайне северной тайги (INT), отрицательное влияние осадков на рост деревьев по толщине проявляется в июле. В сосняках северной тайги (ZLB) такая связь проявляется в мае. В средней и южной тайге связь прироста деревьев сосны по радиусу с осадками отсутствует. Проведенный анализ связи прироста деревьев текущего года с температурой воздуха и осадков прошлого года показал отсутствие связи между этими показателями.

Отношения прирост/климат по длительным временным рядам вегетационного периода показывают нестабильность показателя за период наблюдений (рис. 5). За последние 30–40 лет почти во всех исследуемых сосняках прослеживается тенденция снижения отклика температуры и осадков в радиальном приросте сосны в период с мая по август. Преимущественно на всех исследуемых объектах за период наблюдений наиболее четко выражена взаимосвязь прироста деревьев по толщине с температурой мая, за исключением точки (SYK), где эта связь нестабильна и меняется от отрицательной до положительной. Температуры июня характеризуются слабым или отрицательным сигналом радиального прироста на всех участках. Положительная достоверная связь температур июля наблюдается только на точке ZLB северной тайги, тогда как на других участках эта связь слабая. В сфагновом сосняке южной точки (KOY) в 1988–2018 гг. наблюдается переход к отрицательному сигналу влияния на радиальный прирост сосны температур и осадков мая. В большинстве участков более четкий отклик прироста на температуру отмечается с 1920 по 1970 г.

Преимущественно во всех наблюдаемых участках в ширине годичных колец сосны отчетливо проявляется отрицательное влияние осадков в мае, что, вероятно, связано с негативным влиянием на рост, переувлажнением воздуха и почвы в сосняках. Другие месяцы вегетационного периода показывают нестабильную корреляцию радиального роста с температурами и осадками (см. рис. 5).

В отличие от стандартных функций отклика, анализ по 15-дневным скользящим функциям отражает более тесную связь индексов прироста по радиусу с температурой воздуха, позволяя точнее определить обратную достоверную связь с осадками (Бенькова и др., 2012). Построенные нами графики (рис. 6) позволили выявить закономерности прироста древесины в широтном градиенте. Положительное влияние температуры воздуха на радиальный прирост отмечается преимущественно на всех участках сосняков, проявляясь

периодами: первый с начала мая и до конца июня, второй с конца июня до середины августа. Более высокая по продолжительности положительная связь температур мая и июня с приростом сосны отмечается в северной (ZLB, ILY), наименьшая в средней и южной тайге (PECH, KOY). В крайне северной тайге (INT) первый период наступает несколько позже и длится с 15 мая по 19 июня, второй — с 4 июля по 8 августа. В сосняках северной, средней и южной тайги первый период положительного влияния температуры начинается в первой декаде мая, заканчиваясь на точках ZLB — 24 июня, ILY — 14 июня, PECH — 30 мая, UNA и KOY — 4 июня. Второй период положительного влияния температуры воздуха на прирост годичных колец на точке ZLB длится с 4 июля по 8 августа, ILY — с 4 по 24 июля, UNA — с 30 июня по 19 июля, PECH — с 30 июня по 18 августа, KOY — с 20 июня по 13 августа.

Отрицательное влияние осадков на радиальный прирост по 15-дневным скользящим функциям выявлен в трех исследуемых регионах крайне северной тайги (INT) — с 10 мая по 4 июня, северной (ZLB) — с 5 по 30 мая и южной (KOY) — с 10 по 25 мая. Из рис. 6 видно, что на данных участках увеличение выпадения осадков в начале мая приводит к отрицательному влиянию их на прирост древесины. В южной тайге (KOY) отрицательный эффект влияния осадков на прирост длится порядка 15 дней, резко переходя в положительное влияние, длящееся с конца мая по 24 июня. Затем влияние осадков на прирост в этом районе носит переменное положительное влияние на протяжении всего периода вегетации. В условиях средней тайги на двух участках сосняков (ILY и UNA) на гидроморфных почвах не выявлено отрицательного воздействия осадков на радиальный прирост, показывая положительное влияние их с конца мая — начала июня по 24–29 июня. Близкие даты положительного влияния осадков на прирост отмечаются для сосняков на автоморфных почвах на участках PECH и SYK. На восточной точке участка PECH положительная связь осадков с приростом длится с 30 мая по 24 июня. Однако на западной точке участка SYK период положительного влияния осадков начинается на десять дней раньше, чем восточной и длится с 20 мая по 19 июня. Такая разница в приросте разных частях средней тайги связана с более ранним наступлением весны на точке SYK и более ранним наступлением фенологических дат роста в отличие от восточного участка PECH. Следует отметить, что проведенный анализ по 15-дневным скользящим функциям отклика индексов прироста по радиусу сосны показал значимость влияния температур на рост деревьев мая и начала июня. Затем значимые показатели температур сменяются достоверными значениями осадков длительностью до 25 сут, после чего с середины

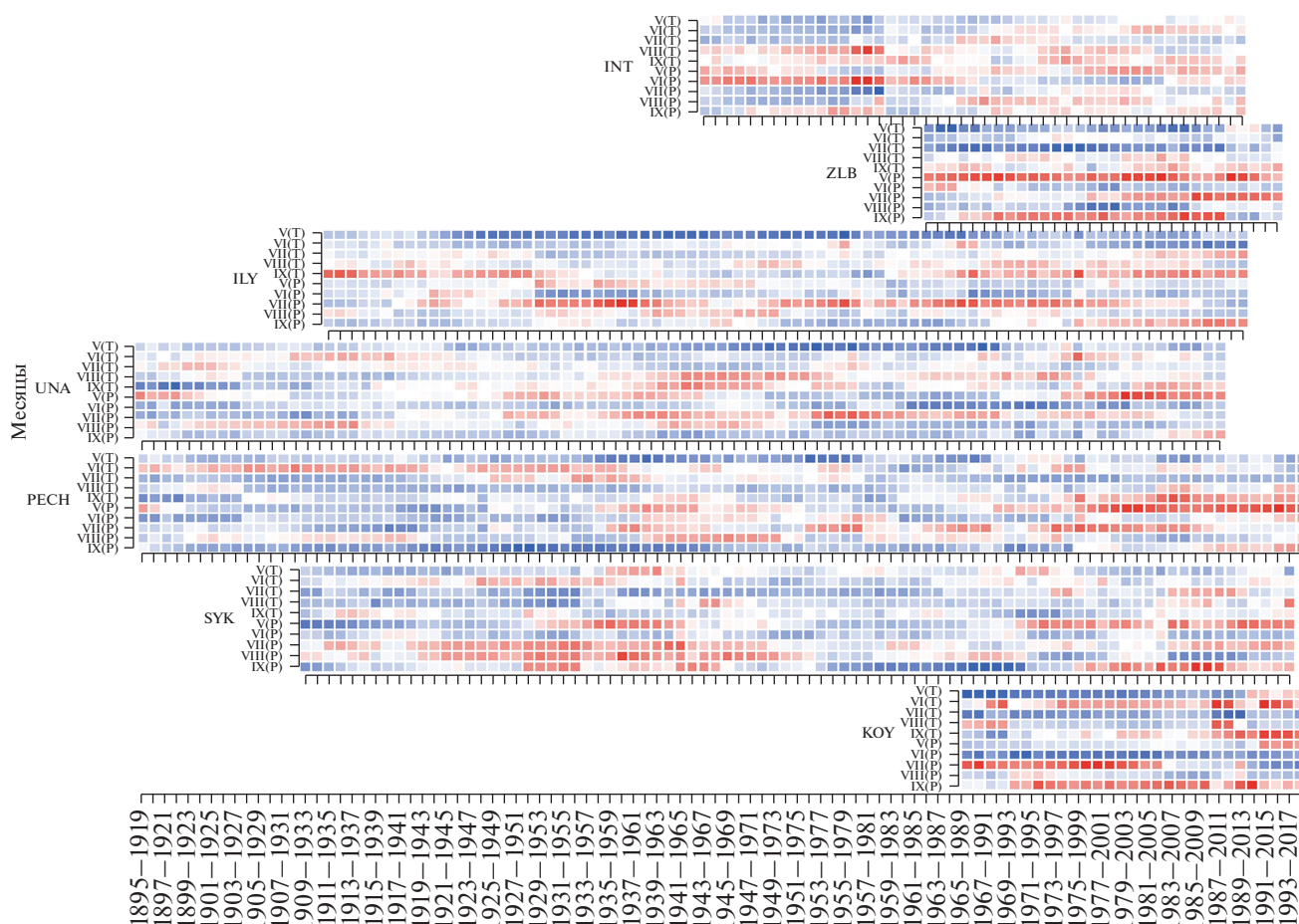


Рис. 5. Корреляция индексов прироста сосны со среднемесячными температурами воздуха (Т) и суммой среднемесячных осадков (Р) в “плавающем” окне по 25-летней ширине.

Примечание. Оттенки синего цвета указывают на положительные значения, красного — на отрицательные значения коэффициентов корреляции. Код участков см. в табл. 1.

лета они меняются обратно в зависимости от температуры воздуха.

ОБСУЖДЕНИЕ

По данным фенологических наблюдений (Патов, 1981), в среднетаежном сосняке черничном Республики Коми, показано, что начало функционирования камбиальной части деревьев сосны зависит от суммы температур и среднесуточной температуры воздуха. Фаза активного роста ствольной древесины начинается при температуре воздуха 10–15°C, температуре верхних слоев почвы 8–11°C и наблюдается обычно с 10 по 20 июня.

Проведенное ранее нами исследование в сосняке лишайниковом в экотоне лес–тундра Республики Коми показало положительную связь хронологии сосны с температурой июня и июля, тогда как осадки не проявили значимого влияния (Манов, 2014). На границе крайне северной и северной тайги этого же региона в сосняках лишай-

никовых отмечен выраженный сигнал температуры на рост сосны, в период с июня по август (Гурская и др., 2017). В средней тайге в условиях Северного Приуралья оценка связи древесно-кольцевых хронологий сосны с климатом показала достоверное положительное влияние температуры июля на прирост, а также отсутствие сигнала с осадками (Drobyshev et al., 2004). В западной части средней тайги Республики Коми значимая статистически достоверная связь прироста сосны с температурой обнаружена в ноябре прошлого и мае текущего года (Loratin et al., 2008). На основе анализа базы дендрохронологических данных (The International Tree-Ring Data Bank) на европейском Северо-Востоке России выявлен положительный достоверный сигнал прироста сосны с температурами июня и июля (Мацковский, Соломина, 2011). Авторы отмечают отсутствие связи прироста у сосны с климатическими условиями предыдущих лет, тогда как у лиственницы и ели они значимы. Результаты наших наблюдений

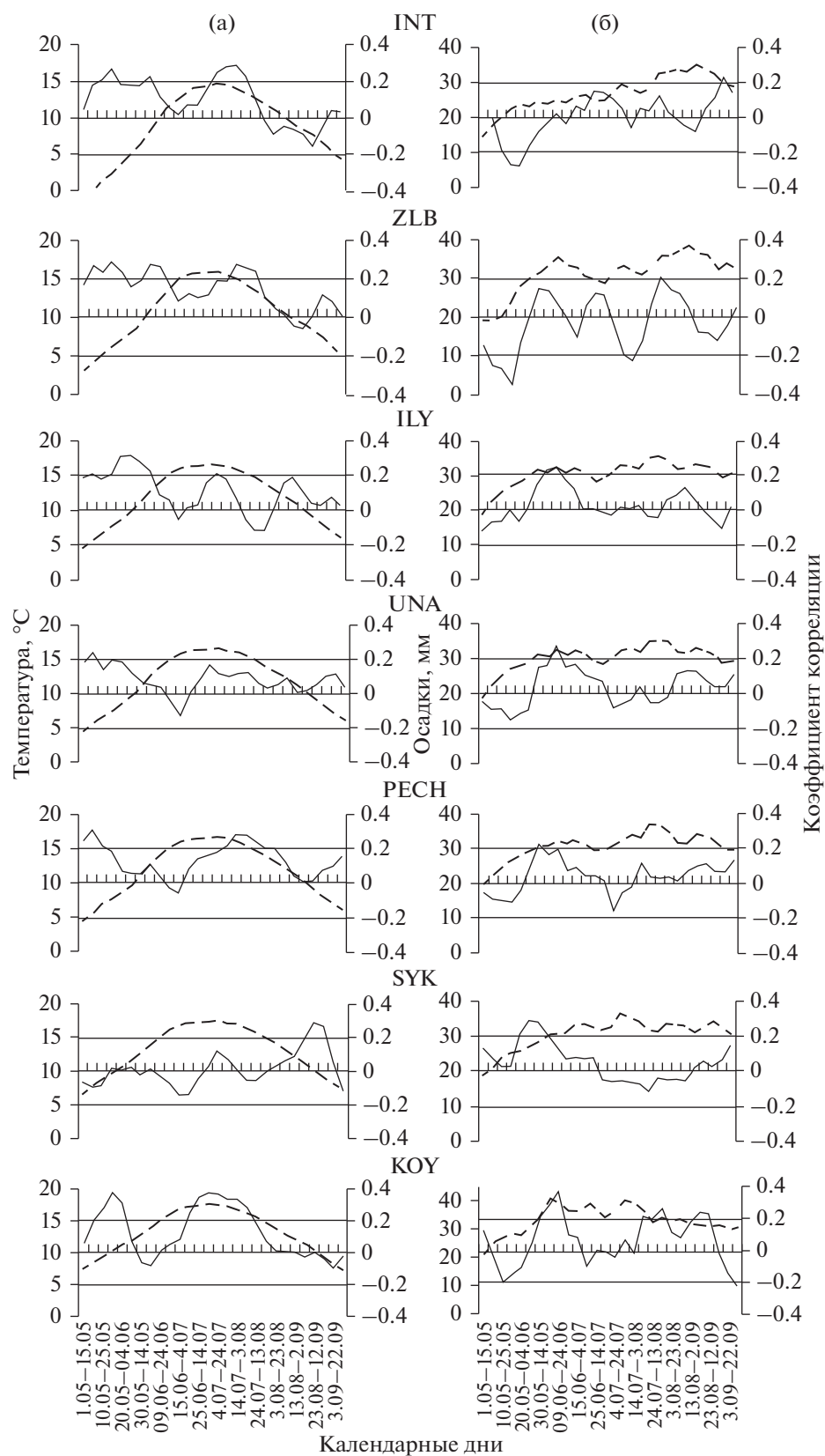


Рис. 6. Корреляция древесно-кольцевых хронологий сосны с температурой воздуха (а) и осадками (б) по 15-дневным скользящим функциям отклика с шагом 5 дней.

Примечание. Пунктирная линия — среднееголетние значения температуры воздуха и осадков, сплошная — 15-дневные функции отклика. Код участков см. в табл. 1.

свидетельствуют о схожей реакции прироста сосны на температуру воздуха и осадки прошлого вегетационного периода. На участках северной тайги (ZLB) и Северного Приуралья на точках (ILY, UNA, PECH) на прирост сосны оказали положительное влияние температуры мая. Значимый отклик температур июня на прирост сосны наблюдается в средней тайге в сосняках на западе республики (SYK) и южной тайги (KOY). Мы предполагаем, что выявленное нами в сосняках северной и средней тайги (Северное Приуралье) положительное влияние на прирост сосны майских температур проявляется в связи с улучшением в этом месяце погодных условий, вследствие чего сигнал июньской температуры сместился на более ранние сроки.

Исследования радиального прироста хвойных видов вдоль уральского хребта показали положительное влияние майских и июльских температур только у сосны и лиственницы в условиях Южного Урала (Шиятов, Мазепа, 1992). Дендроклиматический анализ сосны обыкновенной в центральной Якутии (Nikolaev et al., 2009), выявил достоверную положительную связь прироста с температурой воздуха апреля и мая, после с июня по август эта связь отрицательная. Авторы отмечают, что такие закономерности связаны с небольшим выпадением снега в зимний период, и, как следствие, более ранним оттаиванием и прогреванием почвы.

Переувлажнение и низкие температуры почвы и воздуха в точке крайне северной тайги (INT) приводят к торможению разложения органического вещества и слабому поглощению деревьями элементов питания. Все эти сложившиеся условия, вероятно, приводят к отсутствию связи функций отклика радиального прироста с месячной температурой воздуха и осадками текущего года на данном участке (см. рис. 4). По данным исследований Е.А. Ваганова и А.В. Качева (1992), в заболоченных сосняках Западной Сибири в условиях замедленного разложения органического вещества в гидроморфных и полугидроморфных почвах, связь прироста сосны с климатическими факторами проявляется только на 4–5 год.

Анализ временной динамики сигнала температура/осадки с радиальным приростом за вегетационный период в условиях европейского Северо-Востока показал относительно неустойчивую связь между этими показателями (см. рис. 5). В большинстве исследованных сосняков прослеживается тенденция снижения климатического отклика в приросте деревьев. Эта закономерность может быть связана с адаптационными способностями деревьев к повышению температуры и как следствие снижением реакции на улучшение климатических условий (Briffa et al., 1998; D'Arrigo et al., 2007).

Исследования в Урало-Сибирской Субарктике (Ваганова и др., 1996) показали, что с потеплением климата в начале XX в. прирост деревьев был наиболее синхронным с температурами воздуха, тогда как в конце века эта связь проявлялась наиболее слабо. С потеплением климата и повышенной концентрацией CO_2 в атмосфере происходит увеличение прироста, затем эта реакция ослабевает, и деревья начинают больше реагировать на эдафические факторы (Максимова, Койте, 1999). Исследования реакции прироста на повышение температуры и на засуху у ели, сосны и дуба в центральной Европе показали, что сосна относительно быстро адаптируется к стрессовым условиям засухи и высоких температур в отличие от ели и дуба (Zang et al., 2012).

Скользящие 15-дневные функции отклика индексов радиального прироста сосны показали отсутствие связи температур с радиальным приростом с мая по август и ее положительным проявлением только с 23 августа по 22 сентября в сосняках на точке SYK (см. рис. 6). Возможно, одна из причин отсутствия этой связи в начальный период вегетации и ее проявление в конце лета, по-видимому, связана с межвидовой конкуренцией. Так, при анализе в полученных хронологиях отмечалось достаточно высокое содержание “шумов”, связанных с не климатическими факторами. Во-первых, это подтверждает один из самых низких коэффициентов чувствительности (0.22) на этой точке (см. табл. 1). Во-вторых, деревья сосны на точке SYK не испытывают дефицита тепла в начале вегетации. Положительное влияние температур на прирост в августе–сентябре на этом участке, возможно, связано с формированием поздней древесины. Исследования подзолистых почв среднетаежного сосняка на точке SYK показали, что песчаные почвы, занятые сосновыми насаждениями, прогреваются быстрее в начале вегетационного периода, чем почвы северо-таежных сосняков и способны длительное время сохранять высокие температуры ($+8^\circ\text{C}$) на глубине до 1.5 м (Верхоланцева, 1972).

В образовании органического вещества в древостоях большую роль выполняет фактор влаги (Бобкова, 1987; Frits, 1976; Nikolaev et al., 2009; Zang et al., 2012). Согласно исследованиям (Бобкова, 1987), в лишайниковых сосняках северной тайги в верхних горизонтах почвы запасы влаги были несколько ниже, чем в сосняках зеленомошных, однако в течение всей вегетации были довольно благоприятны для жизнедеятельности растений. На двух участках в сосняках крайне северной (INT) и северной (ZLB) тайги, переувлажнение почвы и ее низкие температуры отрицательно сказывались на радиальном приросте. На протяжении всего вегетационного периода связь осадков с приростом сосны нестабильна. В среднетаежных лишайниковых и черничных сосняках

водный режим почв менее благоприятен для роста растений, чем в северо-таежных тех же типов. Выявлено, что в относительно засушливые годы запас влаги в этих сосняках может быть представлен в доступной форме, в лишайниковых типах в засушливые периоды влажность почвы опускается до “влажности завядания” (Верхоланцева, 1972). Значимость влаги для радиального прироста у сосны хорошо прослеживается с конца мая по июнь на 2-х точках среднетаежных сосняков (РЕСН, SYK). В этот период отмечается активное развитие камбия и начало формирования древесины (Патов, 1981).

Сосняки, развивающихся на полугидроморфных, гидроморфных почвах, в течение большей части вегетационного периода находятся в состоянии периодического переувлажнения и, как следствие, в них ухудшается аэрация корнеобитаемого слоя. Следует также учесть, что в летние периоды в сфагновых типах сосняков верхний торфянистый слой почвы прогревается быстро и способен пересыхать, что, в свою очередь, может привести к дефициту влаги (Бобкова, 1987). Немаловажную роль здесь играет разреженность древесного яруса и как следствие наибольшее поступление на поверхность почвы солнечной радиации (Алексеев, 1975). Увеличение температуры воздуха приводит к потере влаги в почве, тем самым ухудшается гидротермический режим почв и возникает тепловой стресс деревьев (Bjorklund et al., 2017; Frits, 1976). Почти в течение всего июня положительное влияние осадков прослеживается на трех точках сфагновых сосняков (ILY, UNA, KOY). Затем на двух северных точках UNA и ILY эта связь пропадает, тогда как на южной точке (KOY) она проявляется периодически до самого конца лета. Следует отметить, что преимущественно на всех исследуемых точках, при снижении значимых показателей температуры на прирост по толщине сменяется положительными достоверными значениями осадков (см. рис. 6). Вероятно, это связано с высокими температурами июня и июля в средней и южной тайге, приводящими к высыханию верхних горизонтов почв, что влияет на положительную связь влаги в почве. Проведенные исследования динамики ширины годичных колец с климатом в сосняках чернично-сфагновых Западной Сибири (Глебов, Литвененко, 1976), выявили, что более интенсивный рост по толщине у сосны в этих сообществах проявляется при повышенных температуре и осадках. Тогда как при одинаковых суммах температур с повышением или понижением суммы осадков в отличие от нормы прирост древесины возрастает. Авторы объясняют такие климатические колебания изменчивостью уровня воды в почве сфагновых сосняков — со снижением количества осадков повышается переменчивость уровня воды, с повышением — проточность воды.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Древесно-кольцевые хронологии сосны на европейском Северо-Востоке России в зональном аспекте характеризуются неоднородностью климатического отклика. Основными факторами, определяющими рост сосны, выступают температуры мая на территории северной тайги и северного Предуралья, температуры июля — в центральной части средней тайги и юге. На северной границе леса рост сосны лимитирован июльскими температурами лишь на относительно хорошо прогреваемых песчаных почвах (Манов, 2014). Отрицательная связь радиального прироста с осадками мая и июля проявляется только в северных районах исследуемого региона. Корреляция индексов прироста сосны со среднемесячной температурой воздуха и суммами месячных осадков показала ослабление сигнала прироста сосны с конца XX столетия по настоящее время. Такую тенденцию, видимо, следует объяснить адаптивными способностями сосны к благоприятным термическим условиям, сложившимися на исследуемой территории в связи с происходящим изменением климата. Скользящие 15-дневные функции отклика прирост/климат показали, что в течение всего вегетационного периода при ослаблении положительного влияния температуры на прирост, сменяется положительным достоверным влиянием на него осадков. Однако эта тенденция проявляется только на территории средней и южной тайги, в северных районах положительное влияние на прирост лимитируется только положительными значениями температуры воздуха и отрицательным влиянием осадков.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках государственного задания Института биологии Коми НЦ УрО РАН от 10.12.2017 г., гос. регистрации № 1021051101417-8-1.6.19.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность д.б.н. К.С. Бобковой за всестороннюю помощь при подготовке данной статьи.

FUNDING

The work was carried out within the framework of the state assignment of the Institute of Biology of the Komi Scientific Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, state registration no. 1021051101417-8-1.6.19.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors are grateful to Dr. Biol. Sciences K.S. Bobkova for comprehensive assistance in the preparation of this article.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексеев В.А. Световой режим леса. Л., 1975. 225 с.
- Атлас по климату и гидрологии Республики Коми. М.: Дрофа; ДиК, 1997. 116 с.
- Бенькова В.Е., Шашкин А.В., Наурзбаев М.М., Прокушкин А.С., Симанько В.В. Значение микроэкологических условий роста лиственницы Гмелина в экотоне верхней границы леса на полуострове Таймыр // Лесоведение. 2012. № 5. С. 59–70.
- Бобкова К.С. Биологическая продуктивность хвойных лесов Европейского Северо-Востока. Л.: Наука, 1987. 156 с.
- Ваганов Е.А., Качев А.В. Дендроклиматический анализ в лесоболотных фитоценозах Томской Области // Лесоведение. 1992. С. 3–10.
- Ваганов Е.А., Шиятов С.Г., Мазена В.С. Дендроклиматические исследования в Урало-Сибирской Субарктике. Новосибирск: Наука. Сиб. отделение, 1996. 246 с.
- Верхоланцева Л.А. Водно-физические свойства почв сосняков-зеленомошников // Вопросы экологии сосняков Севера (Тр. Коми филиала АН СССР). Сыктывкар, 1972. С. 42–51.
- Глебов Ф.З., Литвененко В.И. Динамика ширины годичных колец в связи с метеорологическими показателями в различных типах болотных лесов // Лесоведение. 1976. № 4. С. 56–62.
- Гурская М.А., Кукарских В.В., Ланге Е. Реконструкция температуры летних месяцев на основе годичных колец сосны обыкновенной *Pinus sylvestris* L., произрастающей в бассейне р. Печора // Изв. РАН. Сер. геогр. 2017. № 6. С. 132–146.
- Комин Г.Е. Влияние климатических и фитоценологических факторов на прирост деревьев в древостоях // Экология. 1973. № 1. С. 74–83.
- Кузнецова В.В., Чернокульский А.В., Козлов Ф.А., Кухта А.Е. Связь линейного и радиального прироста сосны обыкновенной с осадками разного генезиса в лесах Керженского заповедника // Изв. РАН. Сер. геогр. 2020. № 1. С. 93–102.
- Кутявин И.Н. Сосновые леса Северного Приуралья: строение, рост, продуктивность. Сыктывкар: ИБ Коми НЦ УрО РАН, 2018. 176 с.
- Леса Республики Коми / отв. ред. Г.К. Козубов, А.И. Таскаев. М.: ДИК, 1999. 332 с.
- Малышева Н.В., Быков Н.И. Дендроклиматический анализ ленточных боров западной Сибири // Изв. РАН. Сер. геогр. 2011. № 6. С. 68–77.
- Максимов Т.Х., Койке Т. Физиологические аспекты адаптации хвойных и лиственных пород деревьев якутской и японской популяции при возможном потеплении климата / Физиология растений — наука 3-го тысячелетия: Тез. докл. 4-го съезда о-ва физиологов раст. России. М., 1999. Т. 1. С. 412–413.
- Манов А.В. Радиальный прирост сосны обыкновенной в островном массиве бора лишайникового Печорского заполярья // Изв. Коми науч. центра УрО РАН. 2014. Вып. 4 (20). С. 43–49.
- Мацковский В.В., Соломина О.Н. Климатический сигнал в ширине годичных колец хвойных деревьев на севере и в центре Европейской России // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем, 2011. Т. XXIV. С. 256–270.
- Патов А.И. Сезонная динамика прироста соснового древостоя средней подзоны тайги // Проблемы ботаники на Европейском Северо-Востоке РСФСР. Сыктывкар, 1981. С. 38–44.
- Рысин Л.П., Савельева Л.И. Сосновые леса России. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2008. 289 с.
- Шиятов С.Г. Дендрохронология верхней границы леса на Урале. М.: Наука, 1986. 136 с.
- Шиятов С.Г., Мазена В.С. Влияние климатических факторов на радиальный прирост деревьев в высокогорьях Урала // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. СПб.: Гидрометеиздат, 1992. С. 125–134.
- Bastos A., Gouvenia C.V., Trigo R.M. Analyzing the spatio-temporal impacts of the 2003 and 2010 extreme heatwaves on plant productivity in Europe // Biogeosciences. 2014. Vol. 11. № 13. P. 3421–3435. <https://doi.org/10.5194/bg-11-3421-2014>
- Bjorklund J., Seftigen K., Schwirngruber F., Fonti P., von Arx G., Bryukhanova M.V., Cuny H.E., Carrer M., Castaneri D., Frank D. Cell size and wall dimensions drive distinct variability of early wood and late wood density in Northern Hemisphere conifers // New Phytologist. 2017. P. 1–13.
- Briffa K.F., Schweingruber F., Jones P., Osborn T.J., Shiyatov S.G., Vaganov E.A. Reduced sensitivity of recent tree-growth to temperature at high northern latitudes // Nature. 1998. Vol. 391. № 12. P. 678–682.
- Briffa K.R., Osborn T.J., Schweingruber F.H., Harris I.C., Jones P.D., Shiyatov S.G., Vaganov E.A. Tree-ring width and density data around the Northern Hemisphere: P. 1, local and regional climate signals // The Holocene. 2002. Vol. 12. № 6. P. 737–757.
- Bunn A.G. A dendrochronology program library in R (dplR) // Dendrochronologia. 2008. № 26. P. 115–124.
- Climate Change 2013 — The Physical Science Basis Working Group I contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Atmosphere and Surface Publisher: Cambridge Univ. Press, 2014. P. 159–254.
- D'Arrigo R., Wilson R., Liepert B., Cherubini P. On the “Divergence Problem” in Northern Forests: a review of the tree-ring evidence and possible causes // Global Planet Change. 2007. Vol. 60 (3–4). P. 289–305.
- Drobyshev I., Niklasson M., Angelstam P. Contrasting tree-ring data with fire record in a pine-dominated landscape in the Komi Republic (Eastern European Rus-

- sia): recovering a common climate signal // *Silva Fennica*. 2004. Vol. 38 (1). P. 43–53.
- Fritts H.C. Dendroclimatology and dendroecology // *Quat. Res.* 1971. № 4. P. 419–449.
- Fritts H.C. Tree-ring and climate. London; N.Y.; San Francisco: Acad. Press, 1976. 576 p.
- Grissino-Mayer H.D. Evaluating crossdating accuracy: a manual and tutorial for the computer program COFECHA // *Tree-Ring Res.* 2001. № 57. P. 205–221.
- Holmes R.L. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement // *Tree-Ring Bul.* 1983. Vol. 44. P. 69–75.
- Kullman L. Pine (*Pinus sylvestris*) treeline dynamics during the past millennium – a population study in west-central Sweden // *Ann. Bot. Fennici*. 2005. Vol. 42. P. 95–106.
- Lopatin E., Kolström T., Spiecher H. Impact of climate change on radial growth of Siberian spruce and Scots pine in North-western Russia // *iForest*. 2008. № 1. P. 13–21.
<https://doi.org/10.3832/ifer0447-0010013>
- Mc Bean G., Alekseev G., Chen D et al. Arctic climate: past and present. Arctic Climate Impacts Assessment (ACIA). Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2005. P. 21–60.
- Niklasson M., Drakenberg B. A 600-year tree-ring fire history from Norra Kvills National Park, southern Sweden: implications for conservation strategies in the hemiboreal zone // *Biol. Conservation*. 2001. Vol. 101. P. 63–71.
- Nikolaev A.N., Fedorov P.P., Desyatkin A.R. Influence of climate and soil hydrothermal regime on radial growth of *Larix cajanderi* and *Pinus sylvestris* in Central Yakutia, Russia // *Scandinavian J. of Forest Res.* 2009. Vol. 24:3. P. 217–226.
- Rinn F. Tsap version 3.5. Reference Manual. Computer program for tree-ring analysis and presentation. Hellenberg, Germany, Frank Rinn, 1996. 264 p.
- Sumichrast L., Vencurik J., Pittner J., Kucbel S. The long-term dynamics of the old-growth structure in the National Nature Reserve Badinsky prales // *J. of Forest Sci.* 2020. Vol. 66 (12). P. 501–510.
<https://doi.org/10.17221/139/2020-JFS>
- Wigley T.M.L., Briffa K.R., Jones P.D. On the average value of correlated time series, with applications in dendrochronology and hydrometeorology // *J. Climate and Appl. Meteorol.* 1984. Vol. 23. P. 201–213.
- Zang C., Biondi F. Dendroclimatic calibration in R: The bootRes package for response and correlation function analysis // *Dendrochronologia*. 2013. № 31. P. 68–74.
- Zang C., Pretzsch H., Rothe A. Size-dependent responses to summer drought in Scots pine, Norway spruce and common oak // *Trees*. 2012. Vol. 26. P. 557–569.

Dendroclimatic Analysis of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) Radial Growth in the European North-East of Russia

I. N. Kutjavina*, * and A. V. Manov

^aInstitute of Biology, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Syktyvkar, Russia

*e-mail: kutjavina-ivan@rambler.ru

The study's results of the climatic signal with a radial growth of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) on automorphic and hydromorphic soils of the European North-East of Russia (Komi Republic) are presented. Wood samples (cores and cuts) were taken from seven sites located in different subzones of the taiga. Based on these samples, tree-ring chronologies of pine were built, and the relationship between growth and climatic parameters (air temperature, climatic precipitation) was revealed. According to instrumental meteorological observations, in the study area, since the beginning of the 70s of the 20th century, there has been a tendency to an increase in air temperature and the amount of precipitation. In the latitudinal and longitudinal gradients, these indicators are manifested unequally. Analysis of the relationship between climate and growth showed that the main factor providing pine growth in the northern taiga subzone and in the Northern Urals is the temperature in May, and in the middle and southern taiga subzone—in July. In the pine forests of the extremely northern taiga, a reliable negative relationship was found between the width of tree rings and precipitation in May and July. An analysis of the correlation of pine growth indices with average monthly temperatures and the precipitation amount in a floating window in the range of 25 years showed an unstable signal for the growing season. It is noted that over the past 30 years in the European Northeast, there has been a weakening of the climatic signal with wood radial growth. The correlation of the relationship between indexed pine chronologies with sliding fifteen-day values of climatic indicators showed positive relationship between radial growth and air temperature. However, this relationship became insignificant in the middle and southern taiga at the beginning of the growing season. On the contrary, these values are replaced by precipitation. But, such a feature is not manifested in the subzones of the extreme and northern taiga. Here, to a greater extent, the only air temperature has a positive effect on pine growth.

Keywords: North, taiga, dendroclimatology, Scots pine, radial growth, tree-ring chronology, climate

REFERENCES

- Alekseev V.A. *Svetovoi rezhim lesa* [Forest Light Mode]. Leningrad, 1975. 225 p.
- Atlas po klimatu i gidrologii Respubliki Komi* [Atlas on Climate and Hydrology of the Komi Republic]. Moscow: Drofa, DiK Publ., 1997. 116 p.
- Bastos A., Gouvenia C. V., Trigo R.M. Analyzing the spatio-temporal impacts of the 2003 and 2010 extreme heatwaves on plant productivity in Europe. *Biogeosci.*, 2014, vol. 11, no. 13, pp. 3421–3435. <https://doi.org/10.5194/bg-11-3421-2014>
- Ben'kova V.E., Shashkin A.V., Naurzbaev M.M., Prokushkin A.S., Siman'ko V.V. The importance of microecological conditions for growth of *Larix gmelinii* at the timberline on Taimyr Peninsula. *Lesovedenie*, 2012, no. 5, pp. 59–70. (In Russ.).
- Bjorklund J., Seftigen K., Schwrngruber F., Fonti P., von Arx G., Bryukhanova M.V., Cuny H.E., Carrer M., Castaneri D., Frank D. Cell size and wall dimensions drive distinct variability of earlywood and latewood density in Northern Hemisphere conifers. *New Phytologist*, 2017, pp. 1–13.
- Bobkova K.S. *Biologicheskaya produktivnost' khvoynykh lesov Evropeiskogo Severo-Vostoka* [Biological Productivity of Coniferous Forests in the European North-East]. Leningrad: Nauka Publ., 1987. 156 p.
- Briffa K.F., Schweingruber F., Jones P., Osborn T.J., Shiyatov S.G., Vaganov E.A. Reduced sensitivity of recent tree-growth to temperature at high northern latitudes. *Nature*, 1998, vol. 391, no. 12, pp. 678–682.
- Briffa K.R., Osborn T.J., Schweingruber F.H., Harris I.C., Jones P.D., Shiyatov S.G., Vaganov E.A. Tree-ring width and density data around the Northern Hemisphere: Part 1, local and regional climate signals. *The Holocene*, 2002, vol. 12, no. 6, pp. 737–757.
- Bunn A.G. A dendrochronology program library in R. *Dendrochronologia*, 2008, no. 26, pp. 115–124.
- Climate Change 2013 – The Physical Science Basis Working Group I contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Atmosphere and Surface Publisher: Cambridge Univ. Press, 2014, pp. 159–254.
- D'Arrigo R., Wilson R., Liepert B., Cherubini P. On the 'Divergence Problem' in Northern Forests: a review of the tree-ring evidence and possible causes. *Global Planet Change*, 2007, vol. 60 (3–4), pp. 289–305.
- Drobyshev I., Niklasson M., Angelstam P. Contrasting tree-ring data with fire record in a pine-dominated landscape in the Komi Republic (Eastern European Russia): recovering a common climate signal. *Silva Fennica*, 2004, vol. 38 (1), pp. 43–53.
- Fritts H.C. Dendroclimatology and dendroecology. *Quat. Res.*, 1971, no. 4, pp. 419–449.
- Fritts H.C. *Tree-Ring and Climate*. London: Acad. Press, 1976. 576 p.
- Glebov F.Z., Litvenenko V.I. Dynamics of tree ring width in relation to meteorological parameters in various types of wetland forests. *Lesovedenie*, 1976, no. 4, pp. 56–62. (In Russ.).
- Grissino-Mayer H.D. Evaluating crossdating accuracy: a manual and tutorial for the computer program COFECHA. *Tree-Ring Res.*, 2001, no. 57, pp. 205–221.
- Gurskaya M.A., Kukarskikh V.V., Lange E. Reconstruction of summer month temperatures based on scotch pine tree rings (*Pinus sylvestris* L.) growing in the Pechora River basin. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2017, no. 6, pp. 132–146. (In Russ.).
- Holmes R.L. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bull.*, 1983, vol. 44, pp. 69–75.
- Komin G.E. Influence of climatic and phytocenotic factors on the growth of trees in stands. *Ekologiya*, 1973, no. 1, pp. 74–83. (In Russ.).
- Kullman L. Pine (*Pinus sylvestris*) treeline dynamics during the past millennium – a population study in west-central Sweden. *Ann. Bot. Fennici.*, 2005, vol. 42, pp. 95–106.
- Kutyavin I.N. *Sosnovye lesa Severnogo Priural'ya: stroenie, rost, produktivnost'* [Pine Forests of the Northern Cis-Urals: Structure, Growth, Productivity]. Syktyvkar: IB Komi NTs UrO RAN, 2018. 176 p. <https://doi.org/10.31140/book-2018-02>.
- Kuznetsova V.V., Chernokul'skii A.V., Kozlov F.A., Kukhta A.E. The connection between Scots pine linear and radial increment with different genesis' precipitation in forests of the Kerzhenskiy reserve. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2020, no. 1, pp. 93–102. (In Russ.).
- Lesy Respubliki Komi* [Forests of Komi Republic]. Kozubov G.K., Taskaev A.I., Eds. Moscow: DIK Publ., 1999. 332 p.
- Lopatin E., Kolström T., Spiecher H. Impact of climate change on radial growth of Siberian spruce and Scots pine in North-western. *iForest*, 2008, no. 1, pp. 13–21. <https://doi.org/10.3832/ifer0447-0010013>
- Matskovskii V.V., Solomina O.N. Climate signal in the annual width of coniferous trees in the north and in the center of European Russia. *Probl. Ekol. Monitoringa i Modelirovaniya Ekosistem*, 2011, vol. 24, pp. 256–270. (In Russ.).
- Maksimov T.H., Koike T. Physiological aspects of adaptation of coniferous and deciduous trees of the Yakut and Japanese populations with a possible warming of the climate In *Fiziologiya rastenii – nauka 3-go tysyacheletiya* [Plant Physiology - Science of the 3rd Millennium]. Moscow, 1999, vol. 1, pp. 412–413. (In Russ.).
- Malysheva N.V., Bykov N.I. Dendroclimatic analysis of Western Siberia pine belt forests. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2011, no. 6, pp. 68–77. (In Russ.).
- Manov A.V. Radial growth of *Pinus sylvestris* L. in the island massif of lichen pine forest in the Pechora polar regions. *Izv. Komi Nauchn. Tsentra UrO RAN*, 2014, vol. 4 (20), pp. 43–49. (In Russ.).
- Mc Bean G., Alekseev G., Chen D. et al. Arctic climate: past and present. In *Arctic Climate Impacts Assessment*, Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2005, pp. 21–60.
- Niklasson M., Drakenberg B.A. 600-year tree-ring fire history from Norra Kvills National Park, southern Sweden: implications for conservation strategies in the hemiboreal zone. *Biol. Conserv.*, 2001, vol. 101, pp. 63–71.
- Nikolaev A.N., Fedorov P.P., Desyatkin A.R. Influence of climate and soil hydrothermal regime on radial growth

- of *Larix cajanderi* and *Pinus sylvestris* in Central Yakutia, Russia. *Scandinavian J. of Forest Res.*, 2009, vol. 24 (3), pp. 217–226.
<https://doi.org/10.1080/02827580902971181>
- Patov A.I. Seasonal dynamics of growth of pine-spruce stand in the middle taiga subzone. In *Probl. botaniki na Evropeiskom Severo-Vostoke RSFSR* [Problems of Botany in the European North-East of the RSFSR]. Syktyvkar, 1981, pp. 38–44. (In Russ.).
- Rinn F. *Tsap version 3.5. Reference Manual. Computer Program for Tree-Ring Analysis and Presentation*. Hellenberg, Germany, Frank Rinn, 1996. 264 p.
- Rysin L.P., Savel'eva L.I. *Sosnovye lesa Rossii* [Russian Pine Forests]. Moscow: KMK Publ., 2008. 289 p.
- Shiyatov S.G. *Dendrokhronologiya verkhnei granitsy lesa na Urale* [Dendrochronology of the Upper Forest Boundary in the Urals]. Moscow: Nauka Publ., 1986. 136 p.
- Shiyatov S.G., Mazepa V.S. The climatic factors influence on the trees radial growth in the high mountains of the Urals. In *Probl. ekol. monitoringa i modelirovaniya ekosistem* [Problems of Ecological Monitoring and Ecosystem Modeling]. St.Petersburg: Gidrometeoizdat Publ., 1992, pp. 125–134. (In Russ.).
- Sumichrast L., Vencurik J., Pittner J., Kuchel S. The long-term dynamics of the old-growth structure in the National Nature Reserve Badinsky prales. *J. of Forest Sci.*, 2020, vol. 66 (12), pp. 501–510.
<https://doi.org/10.17221/139/2020-JFS>
- Vaganov E.A. Shiyatov S.G., Mazepa V.S. *Dendroklimaticheskie issledovaniya v Uralo-Sibirskoi Subarktike* [Dendroclimatic Studies in the Ural-Siberian Subarctic]. Novosibirsk: SO RAN, 1996. 246 p.
- Vaganov E.A., Kachev A.V. Dendroclimatic analysis of pine growth in forest-bog phytocoenoses of Tomsk province. *Lesovedenie*, 1992, no. 6, pp. 3–10. (In Russ.).
- Verkholantseva L.A. Water-physical properties of soils of green moss pine forests. In *Vopr. ekol. sosnyakov Severa* [Ecological Issues of Pine Forests of the North]. Syktyvkar, 1972, pp. 42–51. (In Russ.).
- Wigley T.M.L., Briffa K.R., Jones P.D. On the average value of correlated time series, with applications in dendrochronology and hydrometeorology. *J. Appl. Meteorol. Climatol.*, 1984, vol. 23, pp. 201–213.
- Zang C., Biondi F. Dendroclimatic calibration in R: The bootRes package for response and correlation function analysis. *Dendrochronologia*, 2013, no. 31, pp. 68–74.
- Zang C., Pretzsch H., Rothe A. Size-dependent responses to summer drought in Scots pine, Norway spruce and common oak. *Trees*, 2012, vol. 26, pp. 557–569.
<https://doi.org/10.1007/s00468-011-0617-z>