

УДК 551.583.4:582.475(470.13)

## РЕКОНСТРУКЦИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ЛЕТНИХ МЕСЯЦЕВ НА ОСНОВЕ ГОДИЧНЫХ КОЛЕЦ СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ *PINUS SYLVESTRIS* L., ПРОИЗРАСТАЮЩЕЙ В БАССЕЙНЕ Р. ПЕЧОРА

© 2018 г. Марина А. Гурская<sup>1,\*</sup>, Владимир В. Кукарских<sup>1</sup>, Елена Ланге<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт экологии растений и животных УрО РАН, Екатеринбург, Россия

<sup>2</sup>Институт ботаники и ландшафтной экологии Университета Грайфсвальда, Грайфсвальд, Германия

\*E-mail: mgurskaya@yandex.ru

Поступила в редакцию 09.08.2016 г.

**Аннотация.** В бассейне реки Печора собраны керны сосны обыкновенной, произрастающей на северном пределе распространения в сосняках лишайниковых, с целью выявить параметры годовичных колец, наиболее подходящих для реконструкции климатических факторов в районе исследования. Ширина годовичных колец имеет слабый смешанный сигнал температуры и осадков предыдущего и текущего годов и не может быть использована для реконструкций. Максимальная оптическая плотность оказалась очень перспективной для реконструкции температуры в районе исследования, а северные островные боры имеют более сильный сигнал, по сравнению с сосняками, произрастающими на 100 км южнее в зоне сплошных сосновых лесов. Впервые выполнена реконструкция температуры летних месяцев за последние 200 лет в районе исследования. Полученные данные согласуются с реконструкциями, выполненными по хронологиям максимальной плотности сосны из Фенноскандии и Евразии.

**Ключевые слова:** сосна, бассейн реки Печора, ширина годовичных колец, максимальная плотность древесины, древесно-кольцевые хронологии, реконструкция температуры летних месяцев.

DOI: 10.7868/S2587556618020061

## RECONSTRUCTION OF SUMMER MONTH TEMPERATURES BASED ON SCOTS PINE TREE RINGS (*PINUS SYLVESTRIS* L.), GROWING IN THE PECHORA RIVER BASIN

Marina A. Gurskaya<sup>1,\*</sup>, Vladimir V. Kukarskih<sup>1</sup>, and Elena Lange<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Plant and Animal Ecology, Ural Branch, Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia

<sup>2</sup>Institute of Botany and Landscape Ecology, Greifswald University, Greifswald, Germany

\*E-mail: mgurskaya@yandex.ru

Received August 09, 2016

**Abstract.** Cores of Scots pine growing in northern taiga on the northern limit of distribution in lichen pine forests in the Pechora River basin are collected with purpose to reveal most suitable for climatic reconstructions tree-ring parameters. Tree-ring width has a weak mixed signal of temperature and precipitations of previous and current years and, therefore, cannot be used for reconstruction. Maximum optical density has shown a very perspective temperature signal for reconstruction in area under study. Northern island pine forests have stronger signal, in comparison with the pine forests growing in 100 km to the south, in a zone of continuous pine forest. Reconstruction of June–August temperature for the last 200 years is executed for the first time. The obtained data have correlated with the reconstruction by chronologies of the maximal density of pine from Fennoscandia and Eurasia.

**Keywords:** Scots pine, Pechora River basin, tree-ring width, maximal wood density, tree-ring chronologies, reconstruction of June–August temperature.

Северные границы распространения древесных растений представляют большой интерес для оценки динамики климатических факторов в прошлом, так как здесь деревья и кустарники произрастают в неблагоприятных климатических условиях и чувствительны к изменениям лимитирующего фактора. Многочисленные исследования посвящены поиску основных параметров, подходов и методов, позволяющих получить наиболее достоверные реконструкции климатических факторов и температуры, в частности, как основного лимитирующего фактора произрастания деревьев в высоких широтах. В настоящее время хорошо зарекомендовали себя реконструкции температуры по ширине годовых колец [2, 5], по максимальной плотности [15, 16], изотопу кислорода [29].

Реконструкция температуры, основанная на годовых кольцах, используется для оценки глобальных изменений климата [17]. Сосна обыкновенная является основным видом, формирующим северную границу распространения деревьев в Фенноскандии и на Кольском полуострове, и часто используется для реконструкции температуры по ширине годовых колец и максимальной плотности [20, 21, 26].

С продвижением на северо-восток европейской части России количество реконструкций на основе колец сосны резко уменьшается, а для западного макросклона Приполярного Урала реконструкции температуры выполнены уже на основе древесно-кольцевых хронологий лиственницы [7], и далее, в Сибири, лиственница становится наиболее популярным видом деревьев для климатических реконструкций [2, 5]. Для севера Печорской низменности дендроклиматических реконструкций не выполнено до сих пор.

Целью этой работы является:

- 1) исследование отклика годовых колец сосны, произрастающей в бассейне р. Печора, как на северном пределе распространения (островные массивы), так и южнее, на границе сплошных сосняков, на климатические факторы;
- 2) выявление параметров годовых колец сосны, наиболее пригодных для реконструкции климатических факторов;
- 3) реконструкция климатических факторов и сравнение результатов с полученными другими исследователями.

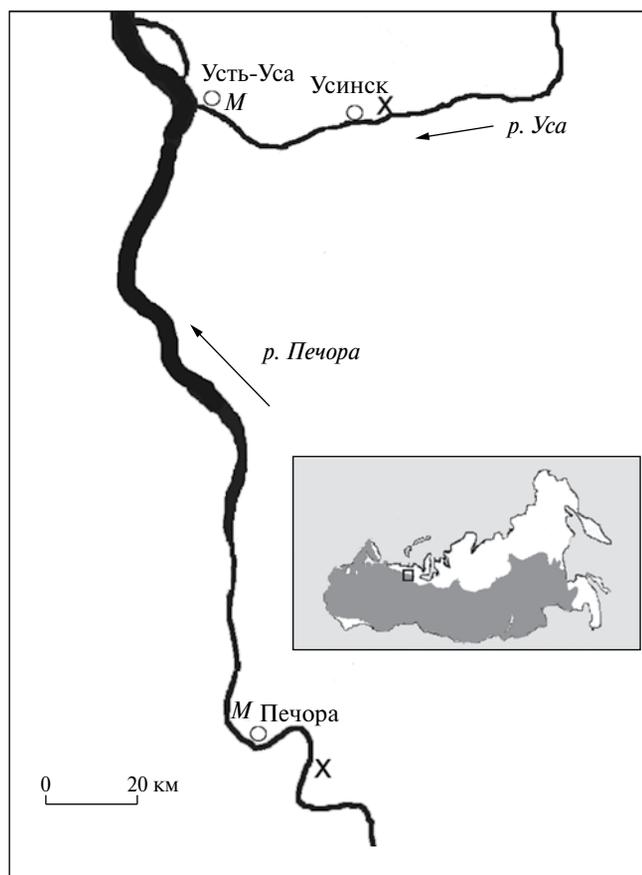
**Материал и методы исследования. Район исследования.** Район исследования находится на северо-востоке европейской части России на севере Печорской низменности. Территория характеризуется выровненностью рельефа, фундамент равнины

составляют палеозойские кристаллические породы, опущенные на глубины до 1.5–3.5 км, скрытые толщами ледниковых и морских отложений. Почвообразующие породы здесь – моренные наносы различного состава, на которых формируются в том числе песчаные бедные почвы. Многолетняя мерзлота отсутствует. Климат континентальный, с Северного Ледовитого океана часто поступает холодный воздух, но влияние атлантических воздушных масс так же велико, что смягчает климатические условия района исследования особенно в зимний период. Самый теплый месяц – июль, а холодный – январь. В результате смешения поступающих воздушных масс климат становится влажным, холодным и характеризуется неустойчивой погодой. В течение года преобладают ветры юго-западного направления, а в теплый период – северного. Осадков за год выпадает 420–500 мм, из них до 70% приходится на теплое время года. Высота снежного покрова достигает до 55 см. Оттаивание почвы наблюдается в мае–июне [8, 10].

**Материал.** Сборы проведены на северном пределе распространения сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), где формируются островные массивы сосны и южнее, в районе сплошных сосновых лесов (рис. 1). Сосняки лишайниковые – один из наиболее типичных для высоких широт восточно-европейской части России тип леса и наиболее сухие сосновые леса в районе сбора образцов.

В окрестностях г. Усинск был выбран бруснично-лишайниковый сосняк (66.0° с.ш., 57.85° в.д., 56 м над ур.м.), расположенный на аллювиальной террасе в 1.2 км от р. Уса, как пример наиболее сухих местообитаний в зоне северных островных сосняков. Средний диаметр деревьев составил 35 см, а высота – 16 м, сомкнутость крон 0.5. Возобновление сосны очень хорошее, другие виды в подлеске представлены слабо. Живой напочвенный покров мозаичен, лишайники составляют до 50% проективного покрытия, брусники несколько меньше, изредка встречаются плауны. Почвы песчаные, свежие, толщина лесной подстилки около 3 см. Возможно, в прошлом были неоднократные пожары, способствующие хорошему возобновлению сосны (рис. 2а).

Вторая точка сбора образцов находилась на 100 км южнее первого местообитания в зоне северной тайги на пределе распространения сплошных сосняков, в окрестностях г. Печора (65.1° с.ш., 57.3° в.д., 60 м над ур.м.), на аллювиальной террасе в 1.4 км от основного русла р. Печора и представляет собой климаксовый сосняк-беломошник, произрастающий на песках. Грунтовые воды залегают глубоко, местообитание сухое. Средний диаметр деревьев



**Рис. 1.** Карта-схема района исследования. Условные обозначения: круг – населенный пункт, X – точка сбора образцов, М – метеостанция. На врезке: серым цветом выделен ареал сосны (Лесная энциклопедия, 1986), прямоугольник – район исследования.

составил 42 см, а высота – 18 м, сомкнутость крон – 0.3. Подлесок редок, напочвенный покров беден, представлен лишайниками рода *Cladonia*. Пожары были достаточно давно, судя по хорошо сформированному лишайниковому покрову, но все-таки были, так как встречаются пни и упавшие стволы (см. рис. 26).

Керны с отдельно- и прямостоящих доминантных деревьев без внешних повреждений и сломанных веток, без двойных вершин, с хорошо сформированной кроной и произрастающие вдали от дорог были собраны в количестве не менее 25 штук с каждого местообитания для построения хронологии УСИ, представляющей северные островные боры и хронологии ПЕЧ, представляющей деревья из зоны сплошного распространения сосны.

**Методы исследования.** В работе были использованы два общепринятых в дендрохронологии параметра – ширина годичного кольца (ШГК) и максимальная плотность древесины (MXD).

Керны для измерения ШГК были зачищены, измерены с точностью 0.01 мм и перекрестно датированы с использованием программ TSAP [28] и COFESHA [24].

В основе денситометрического метода лежит линейная зависимость плотности древесины в стандартных по толщине древесных образцах с оптической плотностью рентгеновского снимка этих образцов [27]. Классическое измерение MXD осуществляется с использованием рентгенографических негативов на микроденситометре DENDRO-2003. Использование установки Itrax MultiScanner (Cox analytical systems) в качестве источника данных по MXD в годичных кольцах на данный момент является пионерным исследованием в дендроклиматологии. На установке Itrax образцы сканируются с шагом 20 мкм с использованием сфокусированного рентгеновского луча высокой энергии и камеры, которая фиксирует количество радиации, которое проходит через образец. Выходом из системы является цифровое изображение с 65536 уровнями серого (16 бит) с максимальным разрешением 0.01 мм (2540 точек на дюйм). Использование этой системы позволяет получать быстрые результаты, сопоставимые по качеству с классическим методом [22].

Керны для денситометрии с использованием установки Itrax были обессмолены и распилены на планки толщиной 1.2 мм. Источником излучения была рентгеновская медная трубка, измерения выполнены при температуре +19 °С и постоянной относительной влажности воздуха 50% с экспозицией 25 мс, интенсивностью 30 кВ/50 мА, и с шагом 20 мкм. Полученные нечеткие рентгеновские изображения были исключены из анализа.

Расшифровка цифрового рентгеновского изображения, полученного на Itrax, проведена в WinDENDRO 2012 [22], где плотность древесины представлена уровнями серого, а для калибровки используется стандартный образец, который сканируется рентгеновскими лучами вместе с образцами. При расшифровке данных ширина виртуальной щели составляет всегда 1 пиксель. Перекрестная датировка индивидуальных серий по MXD проводилась с помощью данных, полученных по ШГК.

Для выявления климатического сигнала в годичных кольцах была проведена процедура стандартизации и двойного детрендinга. Функцией негативной экспоненты удалена возрастная кривая в индивидуальных сериях по ШГК. Возможные эффекты наклона ствола (эксцентричной/кренево́й древесины) и неклиматических факторов окружающей среды (физических, биологических

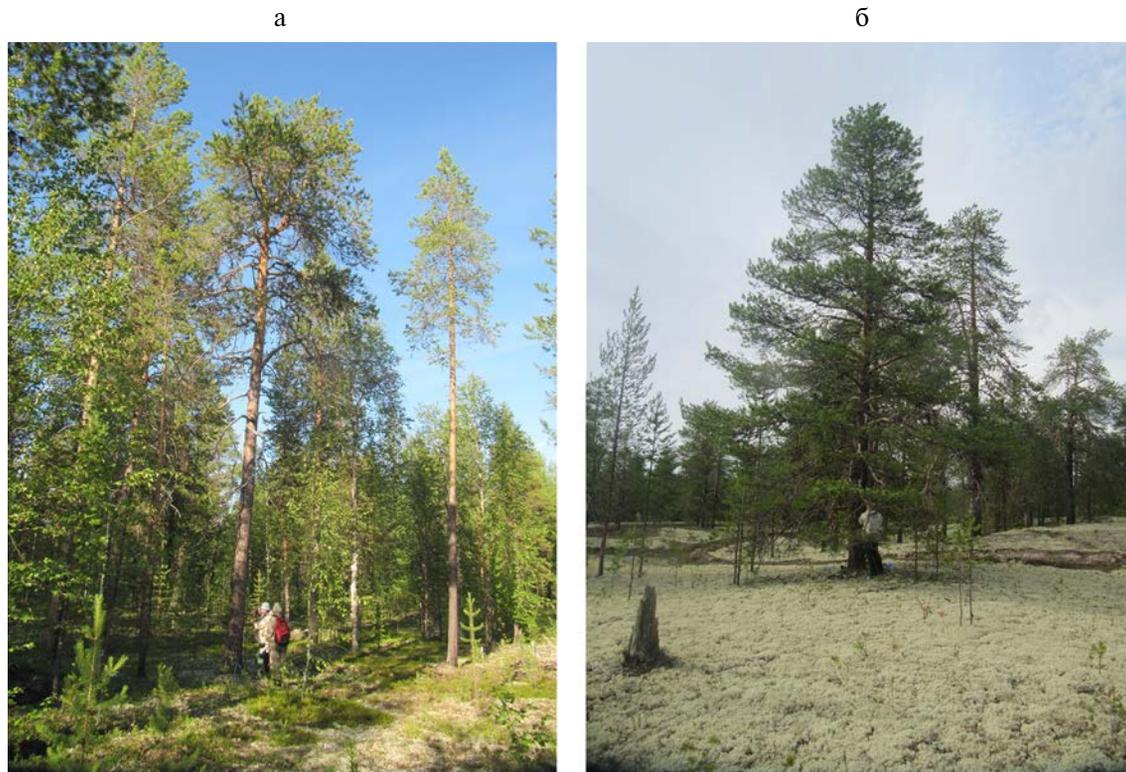


Рис. 2. Фотографии сосняков на местообитании: а – Усинск, б – Печора.

и фитоценологических) удалены с использованием функции кубического сплайна с окном 67% от длины хронологии, который позволяет сохранить возможные низкочастотные колебания в годичном приросте. Серии по MXD были стандартизированы с помощью кубического сплайна с окном 67% от длины хронологии [18]. После проведения стандартизации и индексирования были получены индексированные обобщенные хронологии остатков, которые содержат более сильный сигнал и являются “выбеленными”, то есть, имеют слабую автокорреляционную составляющую или не имеют ее. Качество полученных хронологий оценивалось с помощью общего популяционного сигнала (EPS), который представляет собой уровень дисперсии индивидуальных серий в обобщенной хронологии. В работе использованы те части обобщенной хронологии, когда критическое значение EPS выше 0.85 [19].

Данные по средней месячной температуре и осадкам метеостанции Усть-Уса (65.97° с.ш., 56.92° в.д., 77 над ур.м., период наблюдений 1936–2013 гг.), расположенной в 43 км от местообитания Усинск, и данные по станции Печора (65.12° с.ш., 57.10° в.д., 53 над ур.м., период наблюдений 1944–2013 гг.), расположенной в 13 км от местообитания Печора были использованы для расчета откликов.

Климатический отклик хронологий остатков и стабильность связи климат-рост была проверена с помощью бутстрап-анализа скользящей средней с окном 30 лет с помощью Dendroclim2002 [13]. Реконструкции были выполнены с использованием линейной регрессионной модели. Калибрация и верификация полученных реконструкций проведена в пакете DPL.

Полученные реконструированные ряды температуры были использованы для выявления климатических циклов с помощью спектрального анализа Фурье с преобразованием взвешенного скользящего среднего с окном Хемминга 11, с целью получить сглаженные периодограммы с наиболее выраженными циклами.

**Результаты исследований. Климатические условия района исследования.** Средняя годовая температура воздуха по данным метеостанции Усть-Уса,  $-2.8^{\circ}\text{C}$ , температура января составляет  $-18.4^{\circ}\text{C}$ , а июля  $+14.6^{\circ}\text{C}$ . Устойчивый переход средней суточной температуры через  $5^{\circ}\text{C}$  наблюдается в среднем 30 мая, а ниже  $5^{\circ}\text{C}$  – 20 сентября, дней с температурой воздуха больше  $+5^{\circ}\text{C}$  около 110. Последние весенние заморозки возможны до третьей декады июня, а первые осенние отмечены со второй декады августа, что укорачивает вегетационный сезон до 65–70 дней. Годовое количество

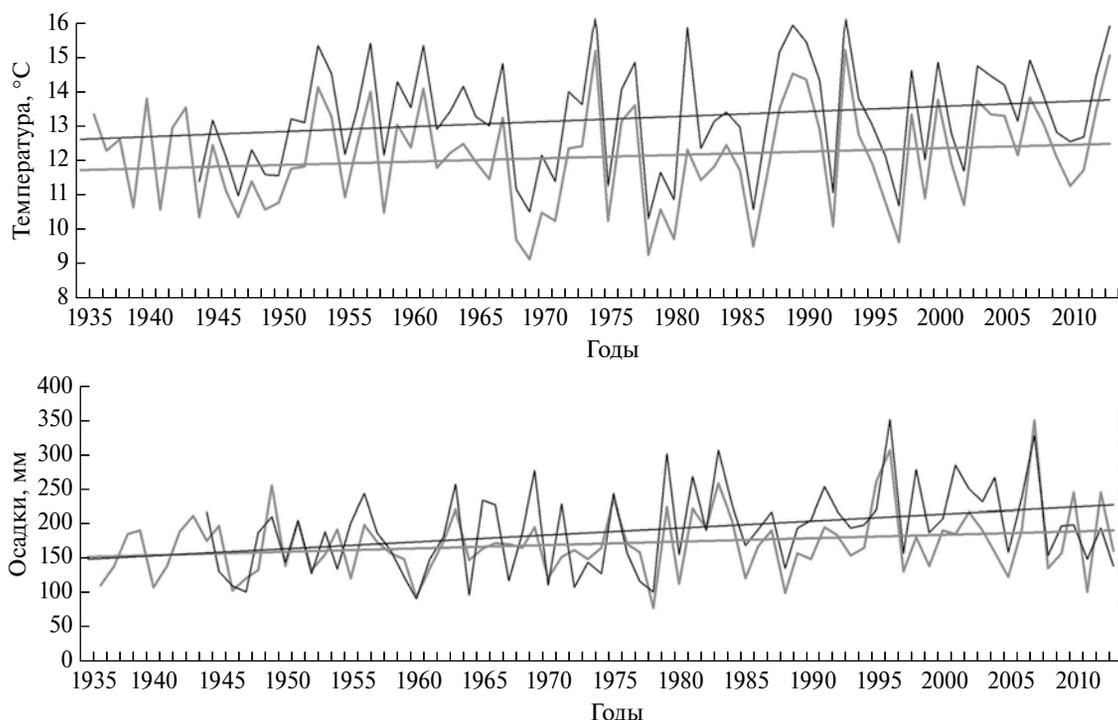


Рис. 3. Климатические условия июня–августа на станциях Усть-Уса (серые линии) и Печора (черные линии).

осадков 490 мм, в теплый период (апрель–октябрь) их выпадает 60% от среднегодового количества, а максимальное количество осадков наблюдается в августе (62 мм).

Согласно данным станции Печора, средняя годовая температура района исследования составляет  $-2.1^{\circ}\text{C}$ , января  $-18.3^{\circ}\text{C}$ , а июль теплее почти на один градус, по сравнению с Усть-Усой  $+15.7^{\circ}\text{C}$ . Переход средней суточной температуры через  $5^{\circ}\text{C}$  наблюдается в среднем 20 мая, а ниже  $5^{\circ}\text{C}$  – 20 сентября, дней с температурой воздуха больше  $+5^{\circ}\text{C}$  около 120. Последние весенние заморозки возможны в первой декаде июня, а первые осенние отмечены после 20–25 августа, безморозный период становится на 10 дней длиннее по сравнению с северным местообитанием, вегетационный сезон длится около 70–75 дней. Годовое количество осадков 580 мм, в теплый период (апрель–октябрь) их выпадает 60% от среднего годового количества, а максимальное количество осадков наблюдается в августе (70 мм).

В период с апреля по июль температура воздуха по данным метеостанции Печора выше в среднем на один градус, чем на станции Усть-Уса, достигая максимума различий в мае (на  $1.6^{\circ}\text{C}$ ). Термические условия с сентября по март между станциями более выровненные. Среднегодовое количество осадков в целом выше на Печоре (580 мм) по сравнению

с Усть-Усой (518 мм), наибольшее сходство между двумя географическими точками по осадкам наблюдается в июле (средние многолетние значения 60 и 59 мм соответственно). Обе метеорологические станции фиксируют тренд повышения температуры и осадков за весь период наблюдений. Средняя суточная температура июня–августа первых тридцати лет наблюдений на  $0.5^{\circ}\text{C}$  ниже температуры последних 30 лет наблюдений, а количество осадков увеличилось на 20 и 40 мм соответственно за эти же периоды (рис. 3).

**Хронологии по ширине и максимальной плотности годовых колец.** Статистические характеристики полученных индивидуальных серий по ШГК показывают, что годовые кольца шире, корреляция между сериями лучше, а чувствительность несколько ниже на южном местообитании, чем на северном (табл. 1). Коэффициент корреляции неиндексированных обобщенных хронологий УСИ и ПЕЧ составляет 0.59, а синхронность изменчивости ШГК достаточно высока и достигает 84. Длина обобщенных хронологий по ШГК составила 274 года, общий интервал между всеми сериями включает период с 1927–2013 гг. (УСИ), и 252 года, период 1870–2013 гг., соответственно, по ПЕЧ (рис. 4). После проведения индексирования и построения остаточной хронологии по ШГК получено, что общий популяционный сигнал выше 0.85 начинается на северной хронологии

Таблица 1. Характеристики древесно-кольцевых хронологий

Хронология	Код	Длина хронологии	Количество образцов	Число колец	Чувствительность	Корреляция между сериями	Максимальная ШГК, мм	Средняя ШГК, мм
ШГК	УСИ	1741–2013	27	3968	0.26	0.67	1.6	0.1
	ПЕЧ	1763–2013	39	6613	0.25	0.70	3.8	0.94
МХД	УСИ	1742–2013	27	3935	0.13	0.71	–	–
	ПЕЧ	1763–2013	36	6122	0.12	0.66	–	–

с 1825 г., а на южной – с 1845 г. и стабильно длится до конца хронологии (рис. 5). Корреляция между полученными после детрендинга индивидуальными сериями достаточно высокая, а сами обобщенные остаточные хронологии хорошо скоррелированы между собой ( $r = 0.67$ ).

Длина обобщенных хронологий по МХД составила 273 года (УСИ) и 252 года (ПЕЧ). Корреляция между индивидуальными сериями достаточно высока, а чувствительность у хронологий

по МХД оказалась очень слабой (см. табл. 1). Коэффициент корреляции двух полученных неиндексированных обобщенных хронологий составляет 0.60, а синхронность между УСИ и ПЕЧ составляет 88. По результатам индексирования получено, что  $EPS > 0.85$  у хронологии остатков УСИ начинается с 1800 г., а у ПЕЧ – с 1845 г. и стабильно длится до 2013 г. Обе остаточных хронологии по МХД имеют высокий коэффициент корреляции (см. рис. 5).

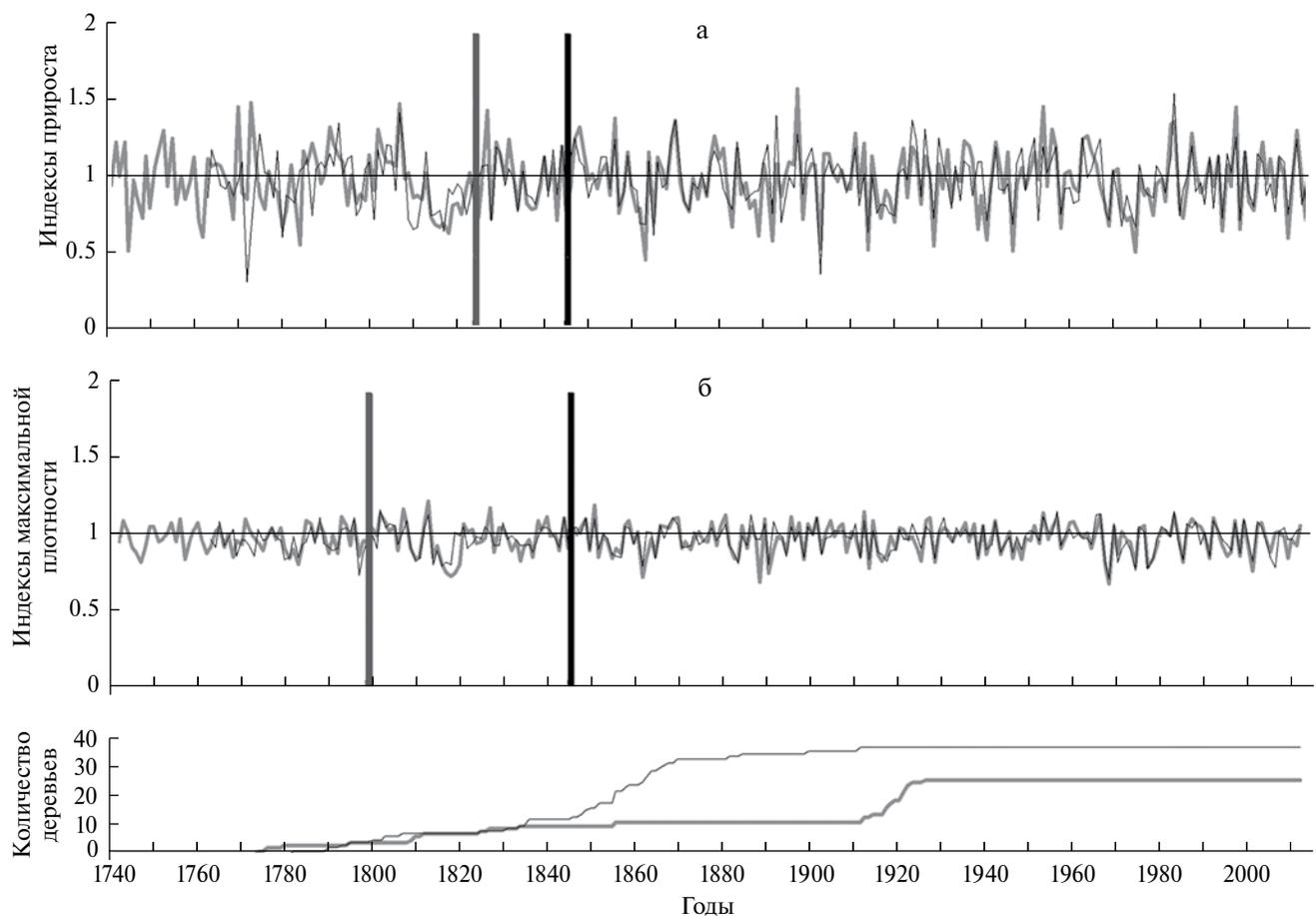
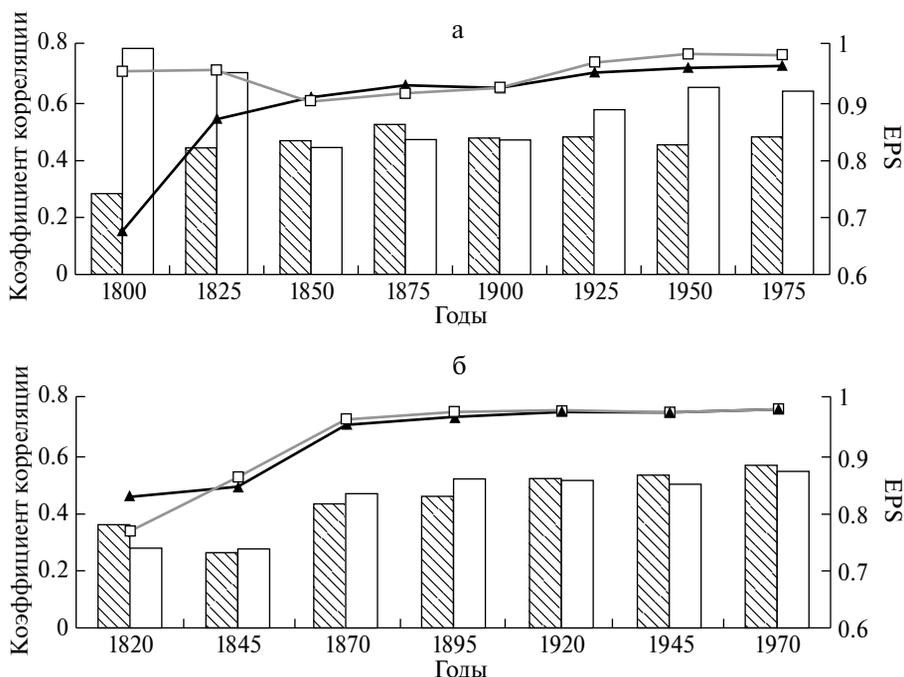


Рис. 4. Количество модельных деревьев и обобщенные хронологии по ШГК (а) и МХД (б) по Усинску (серая линия) и Печоре (черная линия), вертикальные линии – переход значений  $EPS$  выше 0.85.



**Рис. 5.** Коэффициенты EPS (линия) и скользящей средней корреляции между сериями ( $r_{bar}$ ) (столбики) по ШГК (белым цветом) и MXD (черным цветом). а – Усинск, б – Печора.

**Климатический отклик в годичных кольцах.** Хронология УСИ по ШГК имеет положительные корреляции со средними месячными температурами мая и октября предшествующего года, а также января, июня и июля текущего, а ПЕЧ – только с маем и октябрём предшествующего года. Положительная реакция на осадки октября предшествующего года выявлена у УСИ, а у ПЕЧ отмечены положительные связи с осадками июля предшествующего и текущего года и отрицательные с осадками июня (рис. 6). В общем, для коэффициентов корреляции между хронологиями по ШГК и климатическими факторами характерны очень низкие значения (0.23–0.3), а значения коэффициентов регрессии не достигают статистически значимого уровня.

Сильный сигнал выявлен между MXD и температурой июня–августа у УСИ, и мая–августа у ПЕЧ, а сами коэффициенты корреляции очень высокие (0.4–0.7). Хронология УСИ имеет слабые связи с осадками сентября текущего года, а ПЕЧ – положительные связи с августом предшествующего года и отрицательные с августом текущего года (рис. 7).

Принимая во внимание низкие значения коэффициентов корреляции между ШГК и климатическими факторами, а также отсутствием статистически достоверных значений функций отклика,

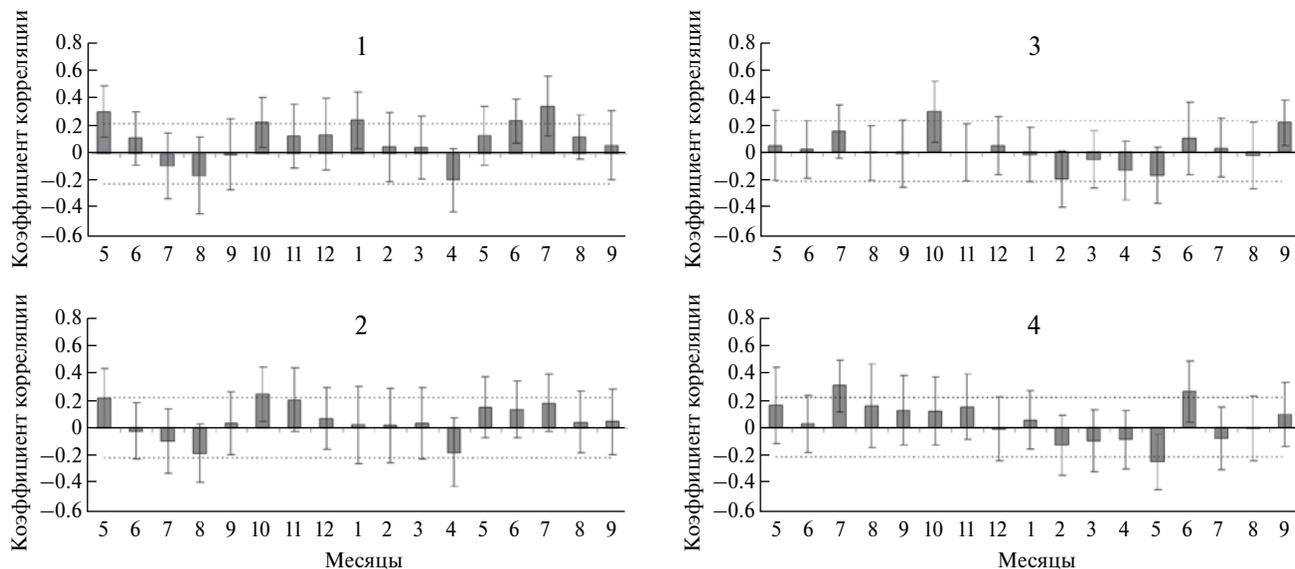
дальнейший анализ устойчивости сигнала был выполнен только для хронологий по MXD.

Связи MXD с температурой мая очень устойчивы у ПЕЧ, а у УСИ стабильный сигнал отмечен только в короткий период 1970–1995 гг., а затем он снижается до статистически незначимого уровня. После 2007 г. наблюдается резкое снижение тесноты связи на обоих местообитаниях до незначимого уровня. В целом, ход кривой коэффициентов регрессии с температурой мая на двух местообитаниях сходен, но значения коэффициентов ниже (а в некоторые периоды они не значимы) для УСИ. После 1990 г. по ПЕЧ выявлены высокие коэффициенты корреляции и регрессии с июнем по сравнению с маем, июлем и августом. Динамика коэффициентов функций отклика по обоим хронологиям сходная.

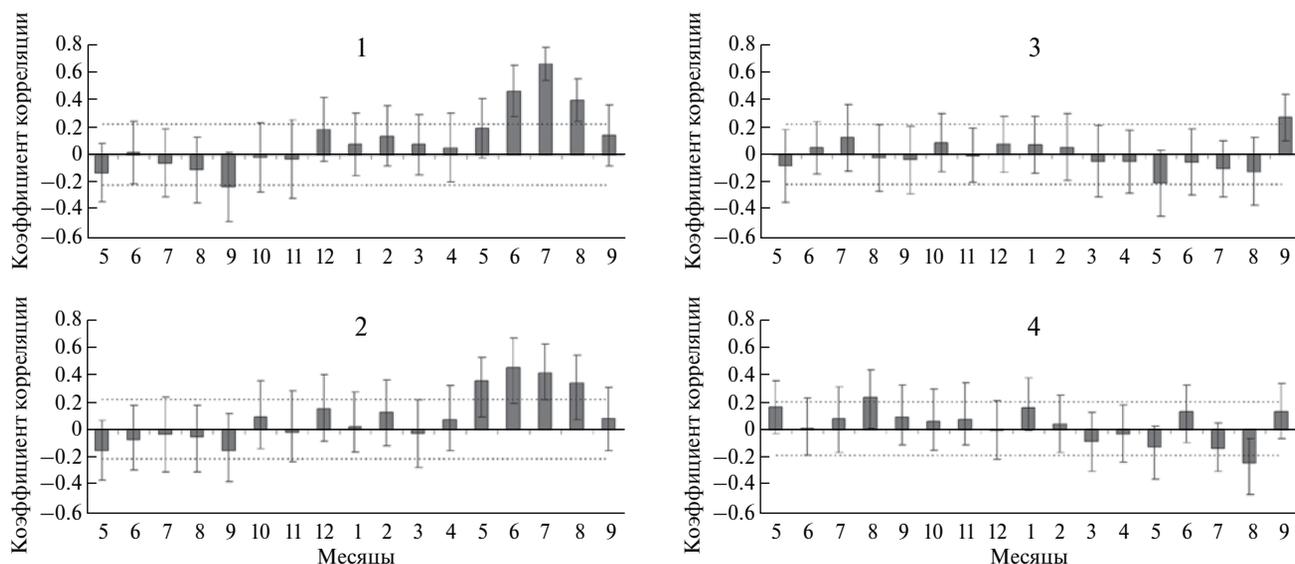
С температурой июля наиболее высокие корреляции отмечены с УСИ, а у ПЕЧ связи так же стабильно статистически достоверны во времени, но менее тесные по сравнению с УСИ.

Сигнал температуры августа меньше, по сравнению с июнем и июлем, особенно у хронологий с северного местообитания. Обе хронологии имеют сходную динамику и стабильность во времени августовского сигнала (рис. 8).

*Реконструкция температуры по плотности.* Учитывая слабый сигнал, содержащийся



**Рис. 6.** Связь между ШГК сосны и средней месячной температурой (1, 2) и суммы осадков (3, 4) за период с мая предшествующего года по сентябрь текущего на местообитании Усинск (1, 3) и Печора (2, 4). Горизонтальные линии – уровень достоверности  $p < 0.05$ .

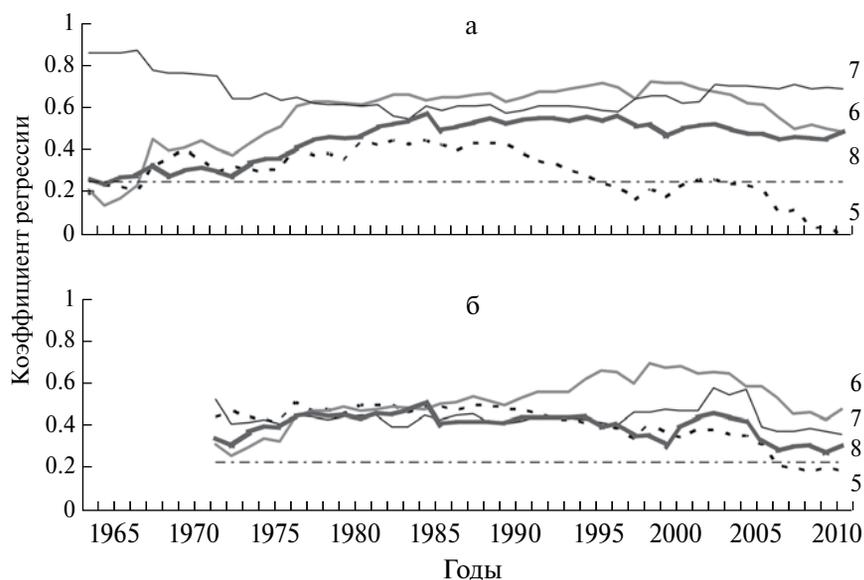


**Рис. 7.** Связь между MXD сосны и средней месячной температурой (1, 2) и суммой осадков (3, 4) за период с мая предшествующего года по сентябрь текущего на местообитании Усинск (1, 3) и Печора (2, 4). Горизонтальные линии – уровень достоверности  $p < 0.05$ .

в хронологиях по ШГК, реконструкции динамики температуры за последние 200 лет были выполнены на основе MXD.

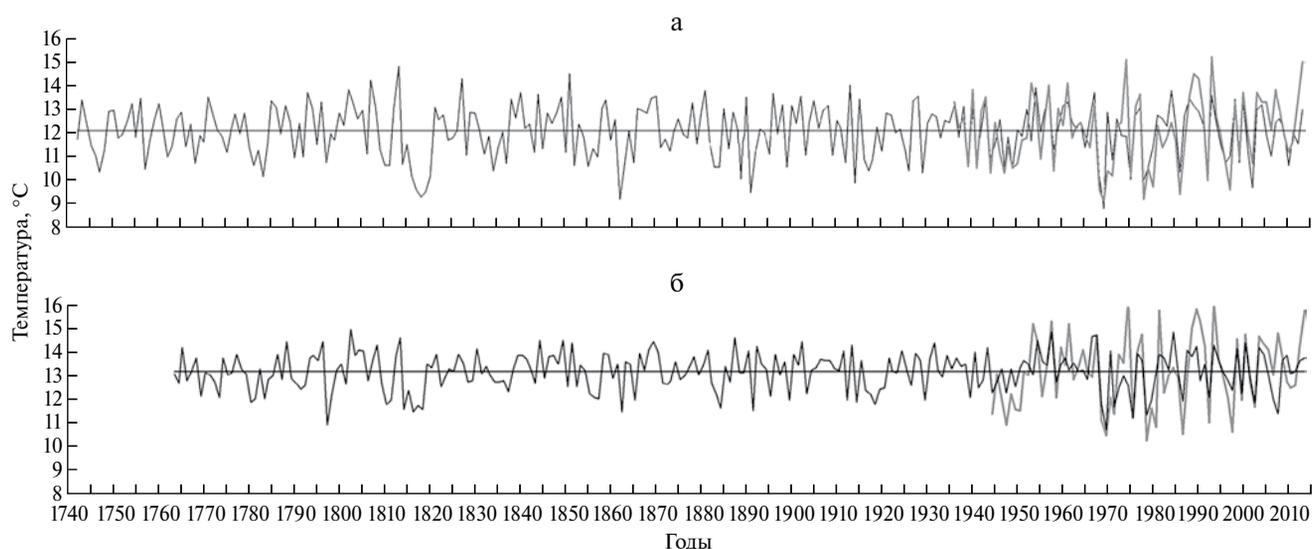
Для хронологии УСИ было получено следующее регрессионное уравнение:  $T = 11.1 \cdot \text{MXD} + 0.93$ . Значения реконструированных рядов хорошо согласуются и близки к уровню инструментальных наблюдений (рис. 9). Статистическая оценка

полученной реконструкции показывает достоверность выполненной реконструкции. Изменчивость MXD у УСИ объясняет динамику температуры июня–августа на 56%, а совпадения однонаправленных колебаний согласно тесту знаков достигают 75%. Очень высокие значения RE показывают хорошие прогностические возможности полученной реконструкции (табл. 2).



**Рис. 8.** Климатический отклик MXD сосны на температуру летних месяцев на основе 30-летнего скользящего осреднения.

а – Усинск, б – Печора. 5, 6, 7, 8 – соответствующие месяцы года. Горизонтальная штрих пунктирная линия – уровень значимости  $p < 0.05$ .



**Рис. 9.** Реконструкции температуры июня–августа по MXD сосны.

а – Усинск, б – Печора. Серый цвет – инструментальные наблюдения, черный – реконструированные данные.

Модель  $T = 9.53MXD + 3.68$  использована для реконструкции температуры июня–августа по ПЕЧ. Полученная реконструкция короче, чем по УСИ, и составляет всего 150 лет. Выполненная реконструкция объясняет почти до 30% имеющейся изменчивости, но совпадения однонаправленных колебаний достигают 71%, что является очень хорошим результатом (см. табл. 2).

Спектральная плотность у обоих реконструированных температурных рядов характеризуется

27–28, 8–10, трех и двухлетними циклами. Реконструкции, выполненные по УСИ, показывают, что плотность 27–30 и 9–10-летних циклов наиболее высокая, а по ПЕЧ – спектральная плотность выделенных циклов примерно равная. Спектральный анализ данных по температуре, полученной на метеостанциях Усть-Уса и Печора, показал другие циклы – наиболее частыми являются 17-летний и 7-летний циклы. В исследуемых рядах 11-летний солнечный цикл не выявлен (рис. 10).

Таблица 2. Калибрация и верификация реконструированной температуры по MXD

Калибрация	УСИ		ПЕЧ		
	Период	1933–1970	1933–2013	1944–1980	1944–2013
$r$		0.75	0.75	0.52	0.54
$R_{adj}^2$		0.57	0.56	0.25	0.28
RE		0.53	0.56	0.27	0.28
T-value		3.9	5.9	2.58	2.5
Тест знаков		23+/12-	59+/19-	25+/12-	50+/20-
Среднее измеренное, °С		11.8	12.0	12.5	12.7
Среднее оценочное, °С		12.1	12.0	12.5	12.7

Верификация				
Период	1970–2013	–	1980–2013	–
$r$	0.73	–	0.49	–
$R_{adj}^2$	0.53	–	0.21	–
RE	0.53	–	0.29	–
T-value	5.1	–	2.5	–
Тест знаков	34+/10-	–	25+/9-	–
Среднее измеренное, °С	12.1	–	13.0	–
Среднее оценочное, °С	12.0	–	12.8	–

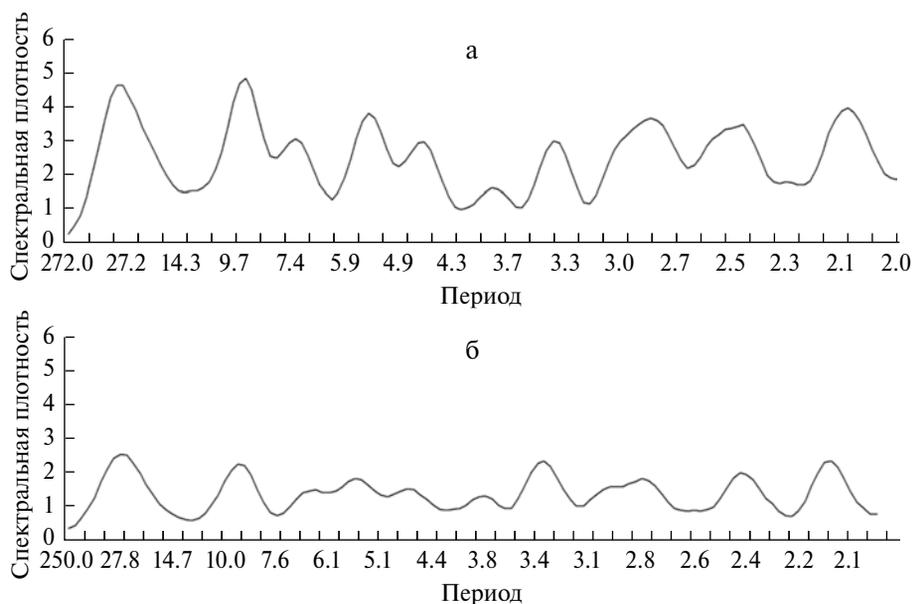


Рис. 10. Спектральная плотность реконструированных рядов.  
 а – Усинск, б – Печора.

**Обсуждение результатов.** Ранее было показано, что в бассейне р. Печора согласованность годичного прироста сосны низкая (на примере точки 65°59' с.ш., 57°48' в.д., EPS = 0.71 [25]). Однако для сухих местообитаний в островных борах и в сплошных сосняках в подзоне северной тайги наши данные это не подтверждают, индивидуальные серии сосны хорошо согласованы, а северные островные местообитания сосны характеризуются более суровыми условиями окружающей среды, по сравнению с условиями произрастания в зоне сплошных сосновых лесов.

Годичный прирост сосны в бассейне р. Печора слабо лимитируется температурой двух летних сезонов. Температура мая предшествующего года влияет на ШГК возможно косвенно через прирост побега по высоте, который происходит в мае–июне [9, 11] и, как следствие, через количество сформированной хвои, фотосинтезирующей активно на следующий год. А в мае текущего года начинается формирование годичного слоя у сосны, произрастающей в бассейне р. Печора.

Наличие сигнала октября предшествующего года в ШГК хвойных деревьев связано с условиями произрастания, формирующимися в поймах крупных рек, возможно, это опосредованный отклик деревьев на промерзание почв, снижение микробной активности и остановки роста корней вследствие формирования ледостава в октябре. Этот феномен был отмечен и ранее в исследованиях отклика годичного прироста хвойных, произрастающих в бассейне р. Обь [12, 23].

Температура летних месяцев текущего года лимитирует рост сосны только на северном пределе произрастания, в островных борах, а южнее, в зоне северной тайги, несмотря на высокую синхронность динамики ШГК как между индивидуальными сериями, так и с северной хронологией, влияние температуры летних месяцев текущего года незначимо. Возможно, существует климатический индекс, который лимитирует годичный прирост у сосны на севере Печорской низменности.

В целом, в бассейне р. Печора нами не выявлен температурный период, влияющий на формирование ШГК, а найдены отдельные месяцы, которые влияют на интегральную величину прироста. Несмотря на это, большая изменчивость и высокая чувствительность ШГК к условиям окружающей среды предполагает воздействие общего лимитирующего фактора.

Отсутствие связей ШГК с летними осадками в северных островных борах связано со свежими условиями почвы и, следовательно, с отсутствием

влагодефицита в течение лета на выбранном местообитании. Осадки октября предшествующего года способствуют глубокому увлажнению почвы и медленному ее промерзанию, что несколько удлиняет осенний период и подготовку деревьев к зимнему периоду. Подобные связи с осенними осадками отмечены для сосны в Западной Сибири [6].

Сухие условия произрастания на местообитании Печора способствуют усилению отклика ШГК на осадки вегетационного периода предыдущего и текущего годов по сравнению с северными местообитаниями. В период интенсивного роста побегов и формирования хвои осадки июля предыдущего года оказываются важным фактором формирования ШГК в следующем году. Негативное влияние осадков мая является индикатором временного переувлажнения почвы, как из-за весеннего таяния снега, так и большого количества осадков и относительно меньшего количества приходящей солнечной радиации и, как следствие, задержки активного деления камбиальных клеток. Снижение годичного прироста под влиянием майских осадков текущего года показано так же и у лиственницы, произрастающей на северо-востоке республики Коми в горах Приполярного Урала [7]. Осадки июня, напротив, способствуют увеличению ШГК опосредованно, через достаточное количество влаги, поступающей в растягивающиеся клетки ранних трахеид. Таким образом, влияние осадков на ШГК сосны, произрастающей в бассейне р. Печора неоднозначно. Отсутствие общих закономерностей влияния осадков на рост сосны на северном пределе распространения отмечено и в Западной Сибири [6]. Возможно, использование различных гидротермических коэффициентов установит связи между ШГК и климатом на территории Печорской низменности в бассейне р. Печора.

Полученные статистические связи между температурой и ШГК сосны, произрастающей в бассейне р. Печора, отличаются от данных других исследователей для западной части ареала (Фенноскандия, Кольский полуостров), отмечающими хороший температурный сигнал, который позволяет проводить реконструкции температуры [14, 21], и согласуются с данными по Западной Сибири, где хронологии по ШГК имеют слабый сигнал июня–июля текущего года [5]. Таким образом, с продвижением на восток климатический сигнал в хронологиях по ШГК сосны убывает.

Хронологии MXD имеют четко выраженный сигнал летних месяцев текущего года. Период активного запаса углерода на севере произрастания сосны составляет всего три летних месяца,

и он короче, чем на южном местообитании. В июле наблюдается наиболее высокая скорость фотосинтеза и процессов, ведущих к наиболее эффективному депонированию углерода в поздней древесине. На южном местообитании выделить основной месяц, влияющий на MXD, довольно затруднительно на основе имеющегося материала, температурный сигнал распределен более равномерно в течение периода май–август.

Полученные данные согласуются с результатами других исследователей [2, 3, 5, 14, 16], показывающие, что на северном пределе распространения сосны вегетационный сезон короткий, а распределение отклика на температуру отражает ход температур вегетационного периода. Высокий процент объяснимой дисперсии, полученной для северной хронологии, указывает на ведущее влияние температуры воздуха июня–августа на формирование клеточных стенок трахеид. На более южном местообитании влияние температуры значительно слабее,

**Таблица 3.** Температурные аномалии (первые 10 для общего периода 1845–2012) на основе хронологий УСИ и ПЕЧ и сравнение с данными по северному полушарию (первые 30 аномалий температуры)

Район	Усинск		Печора		Северное полушарие	
	°С	ранг	°С	ранг	°С	ранг
1817	2.5	—	—	—	3.8	5
1818	2.8	—	1.6	—	2.5	22
1819	2.6	—	—	—	2.2	29
1862	2.9	2	1.7	5	—	—
1884	—	—	1.5	7	2.8	13
1889	2.0	7	—	—	—	—
1891	2.6	3	1.6	6	—	—
1914	2.2	5	—	—	—	—
1918	—	—	1.4	10	—	—
1929	1.7	10	—	—	—	—
1968	1.9	9	1.4	9	2.4	24
1969	3.3	1	2.5	1	—	—
1971	—	—	1.5	8	—	—
1975	2.0	8	1.9	2	—	—
1978	2.0	6	1.9	3	2.8	14
2002	2.4	4	—	—	—	—
2007	—	—	1.8	4	—	—

а MXD может зависеть и от других факторов, таких как экстремальные природные явления, биотические конкурентные отношения в сосняках и др.

Несмотря на выявленное за период наблюдений повышение температуры на 0.5 °С связи с температурой воздуха июля и MXD в северных островных борах остаются постоянными и на одном уровне, а теснота связи с июнем и августом увеличиваются к 1980 г. и становится стабильной. Южнее, в более благоприятных условиях произрастания, температура летних месяцев слабее лимитирует MXD, особенно в последние 7–10 лет (с 2007 г.).

Тесная линейная зависимость между температурой воздуха и MXD позволила провести реконструкцию температуры воздуха. Полученная реконструкция позволила выявить теплые и холодные периоды в районе исследования с 1800 г. на местообитании Усинск и с 1845 на местообитании Печора, длящиеся по 5–10 лет. Ниже средних многолетних температур отмечены периоды 1815–1820, 1832–1838, 1854–1866, 1883–1894, 1916–1921, 1944–1952, 1968–1971, 1977–1988 гг. А периоды с положительными аномалиями температур – 1800–1810, 1840–1850, 1898–1911, 1951–1961 гг. Выполненные реконструкции хорошо согласуются с реконструкциями по ШГК и MXD для Фенноскандии [21].

Общий сигнал аномально низких температур летнего периода на обоих местообитаниях отмечен в 1862, 1891, 1968, 1969 гг., эти четыре года входят в десятку наиболее холодных лет в бассейне р. Печора, по северу Западной Сибири и в северном полушарии [3, 15]. Кроме общих лет, выявлены годы с климатическими различиями. На северном местообитании в десятку низкотемпературных аномалий вошли 1889, 1914, 1929 и 2002 гг. На более южном местообитании эти же годы также являются холодными, но не настолько, здесь выделяются 1884, 1918, 1971 и 2007 гг. (табл. 3).

Десять лет с максимальными значениями MXD сосны в северных борах отмечены в 1844, 1851, 1881, 1896, 1913, 1954, 1957, 1967, 1984, 1993 гг., а южнее – в 1844, 1849, 1869, 1887, 1902, 1954, 1957, 1966, 1967, 1984 гг. Общие годы – 1844, 1954, 1957, 1967, 1984. Согласно полученным связям с температурой воздуха и выполненным реконструкциям, эти годы характеризовались теплым вегетационным сезоном или отдельными месяцами, которые имеют наиболее тесные связи с MXD (например, июль у УСИ и июнь у ПЕЧ). Это утверждение подходит 1957 и 1967 гг. А очень теплые 1974 и 1989 гг. не были зафиксированы в первой десятке колец с самой высокой MXD. Таким образом, реконструкции температуры в теплые летние периоды на основе MXD

не всегда выполняются корректно, особенно это заметно по южным местообитаниям. Вероятно, существует пороговая температура, выше которой MXD не имеет выраженного сигнала.

Выявленный длинный и наиболее частый 27–30-летний цикл в реконструированных рядах по продолжительности близок к циклу Брикнера (25–50 лет), а также он соответствует 30-летнему гидротермическому периоду, рекомендованному ВМО для исследования климата. Кроме этого, этот цикл может соответствовать динамике возобновления сосны на исследуемых территориях (появлению поколений). Эта гипотеза требует дополнительного исследования. Второй по частоте 8–9-летний цикл сложнее интерпретировать, он короче 11-летнего солнечного цикла, и может представлять собой комбинацию коротких 2–3-летних циклов. Возможно, этот цикл приурочен к семеношению сосны, которая плодоносит на севере с периодичностью в восемь слабоурожайных или даже в период 1–17 лет [1]. Короткие 2–3-летние циклы скорее всего отражают формирование и активный фотосинтез хвои. Кроме этого, нельзя исключить и влияние других внешних астрономических факторов, кроме солнечных циклов.

**Заключение.** В бассейне р. Печора на севере Печорской низменности на границе сплошного ареала сосны и в северных островных борах ШГК сосны имеет смешанный слабый сигнал температуры и осадков, как текущего, так и предыдущего года, и не может быть использована для реконструкции температуры летних месяцев текущего года.

Хронология по MXD у сосны, произрастающей на северном пределе распространения в островных борах на сухих местообитаниях, имеет хорошо выраженный температурный сигнал июня–августа. Получены реконструкции температуры июня–августа для северного предела распространения сосны (островных боров).

На более южных местообитаниях, на пределе сплошного распространения сосны, произрастающей на сухих местообитаниях в подзоне северной тайги, сигнал, содержащийся в хронологиях по MXD слабее. В то же время его статистические характеристики показывают, что этот температурный сигнал так же может быть использован для реконструкций суммы температур, как июня–августа, так и мая–августа. Выполненные реконструкции на основе MXD, измеренной на Itraх, показывают высокую согласованность с данными, полученными для Евразии классическим способом оценки MXD, в частности, на основе реконструкций по лиственнице.

**Благодарности.** Работа выполнена при частичной поддержке грантов РФФИ № 14-04-91356 и 15-04-04933 и программы УрО РАН № 15-2-4-22.

Авторы выражают благодарность работникам Печорского и Усинского лесничеств за помощь в поиске и подборе местообитаний сухих сосняков.

**Acknowledgments.** This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research, projects no. 14-04-91356; 15-04-04933 and the Program of Urals Branch of the RAS, project no. 15-2-4-22.

The authors are grateful to Usinsk and Pechora forestries for their help in search for dry pine forest sites.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Белецкий И.Б.* Плодоношение сосны на Кольском полуострове. Исследования и рекомендации производству. Мурманск: Кн. изд-во, 1968. 131 с.
2. *Ваганов Е.А., Шиятов С.Г., Мазена В.С.* Дендроклиматические исследования в Урало-Сибирской Субарктике. Новосибирск: Изд. фирма СО РАН, 1996. 246 с.
3. *Гурская М.А., Агафонов Л.И.* Реконструкция коротких вегетационных сезонов на севере Западной Сибири по хронологиям светлых годичных колец деревьев // Изв. РАН. Сер. геогр. 2013. № 1. С. 42–53.
4. Лесная энциклопедия: В 2-х т., т. 2 / Гл. ред. Воробьев Г.И. М.: Сов. Энциклопедия, 1986. 631 с.
5. *Мазена В.С.* Погодичная реконструкция средней летней температуры воздуха на севере Западной Сибири с 1690 г. на основе данных о радиальном приросте деревьев // Сибирский экологический журнал. 1999. № 2. С. 175–183.
6. *Мазена В.С.* Влияние осадков на динамику радиального прироста хвойных в субарктических районах Евразии // Лесоведение. 1999. № 6. С. 14–21.
7. *Манов А.В., Загирова С.В.* Климатический сигнал в древесно-кольцевых хронологиях лиственницы на западном макросклоне Приполярного Урала // Изв. РАН. Сер. геогр. 2015. № 4. С. 70–77.
8. *Семенов Б.А., Цветков В.Ф., Чибисов Г.А., Елизаров Ф.П.* Притундровые леса европейской части России (природа и ведение хозяйства). Архангельск: книжное изд-во, 1998. 332 с.
9. *Смирнов В.В.* Сезонный рост главнейших древесных пород. М.: Наука, 1964. 168 с.
10. Физико-географическое районирование Северозапада СССР / Под ред. А.Г. Исаченко. Л.: ЛГУ, 1965. 244 с.
11. *Цветков В.Ф., Семенов Б.А.* Сосняки Крайнего севера. М.: Агропромиздат, 1985. 116 с.
12. *Agafonov L.I. and Gurskaya M.A.* The Influence of the Lower Ob River Runoff on Radial Growth of Trees // Contemporary Problems of Ecology. 2013. Vol. 6. No. 7. P. 779–787.

13. *Biondi F. and Waikul K.* DENDROCLIM2002: A C++ program for statistical calibration of climate signals in tree-ring chronologies // *Computers & Geosciences*. 2004. No. 30. P. 303–311.
14. *Briffa K.R., Barholin T.S., Eckstein D., Jones P.D., Karlen W., Schweingruber F.H., and Zetterberg P.* A 1400-year tree-ring record of summer temperatures in Fennoscandia // *Nature*. 1990. No. 346. P. 434–439.
15. *Briffa K.R., Jones P.D., Schweingruber F.H., and Osborn T.J.* Influence of volcanic eruptions on Northern Hemisphere summer temperature over the past 600 years // *Nature*. 1998. No. 393. P. 450–455.
16. *Briffa K.R., Osborn T.J., Schweingruber F.H., Jones Ph.D., Shiyatov S.G., and Vaganov E.A.* Tree-ring width and density data around the Northern Hemisphere: Part 2, spatio-temporal variability and associated climate patterns // *The Holocene*. 2002. Vol. 12. No. 6. P. 759–789.
17. *Climate change 2007: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change.* Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2007. 996 p.
18. *Cook E. and Holmes R.* Guide for computer program ARSTAN, Adapted from Users Manual for Program ARSTAN. Laboratory of Tree-Ring Research, University of Arizona, 1986. P. 50–65.
19. *Cook E.R., Kairiukstis L.A.* (eds.). *Methods of dendrochronology. Applications in the environmental sciences.* Kluwer Academic Publ.: Dordrecht, 1989. 394 p.
20. *Gervais B.R. and MacDonald G.M.* A 403-Year Record of July Temperatures and Treeline Dynamics of *Pinus sylvestris* from the Kola Peninsula, Northwest Russia // *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*. 2000. Vol. 32. No. 3. P. 295–302.
21. *Grudd H.* Tornetrask tree-ring width and density AD500–2004: a test of climatic sensitivity and a new 1500-year reconstruction of North Fennoscandian summers // *Climate Dynamic*. 2008. Vol. 31. P. 843–857.
22. *Guay R.* WinDENDRO 2012: User's Guide, Regent Instruments. Inc., Quebec, Canada, 2012.
23. *Gurskaya M.A., Hallinger M., Eckstein D., and Wilming M.* Extreme cold summers in Western Siberia derived from light rings of conifers // *Phyton*. 2012. Vol. 52. No. 1. P. 101–119.
24. *Holmes R.L.* Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement // *Tree-Ring Bulletin*. 1983. No. 43. P. 69–78.
25. *Lopatin E., Kolström T., and Spiecker H.* Impact of climate change on radial growth of Siberian spruce and Scots pine in North-western Russia // *iForest*. 2008. No. 1. P. 13–21. doi: 10.3832/ifer0447-0010013.
26. *McCarroll D., Loader N.J., Jalkanen R., Gagen M.H., Grudd H., Gunnarson B.E., Kirchhefer A.J., Friedrich M., Linderholm H.W., Lindholm M., Boettger T., Los S.O., Remmele S., Kononov Yu.M., Yamazaki Y.H., Young G.H.F., and Zorita E.* A 1200-year multiproxy record of tree growth and summer temperature at the Northern pine forest limit of Europe // *The Holocene*. 2013. Vol. 23. No. 4. P. 471–484.
27. *Polge H.* New investigations on wood by densitometric analysis of radiographs // *Joyce Loebel Review*. 1966. Vol. 2. No. 2. P. 9–14.
28. *Rinn F.* TSAP Time Series Analysis and Presentation. Version 3.0. Reference Manual. Heidelberg, 1996. 262 p.
29. *Saurer M., Schweingruber F., Vaganov E.A., Shiyatov S.G., and Siegwolf R.* Spatial and temporal oxygen isotope trends at the Northern tree-line in Eurasia // *Geophysical Research Letters*. 2002. Vol. 29. No. 9. P. 71–74.

## REFERENCES

1. *Beletskij I.B.* *Plodonoshenie sosny na Kol'skom poluostrove. Issledovaniya i rekomendatsii proizvodstvu* [Fruiting Pine on the Kola Peninsula. Research and Production Recommendations]. Murmansk: Knizhnoe Publ., 1968. 131 p.
2. *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.
3. *Gurskaya M.A., Agafonov L.I.* Reconstruction of the short growing season at the north of Western Siberia on light-ring chronologies. *Izv. Ross. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2013, no. 1, pp. 42–53. (In Russ.).
4. *Lesnaya entsiklopediya* [Forest Encyclopedia]: Vol. 2. Vorob'ev G.I., Ed. Moscow: Sov. Entsiklopediya, 1986. 631 p.
5. *Mazepa V.S.* Annual reconstruction of mean summer air temperature in the north of Western Siberia since 1690 on the basis of radial growth of trees. *Sibirskii ekologicheskii zhurnal*, 1999, no. 2, pp. 175–183. (In Russ.).
6. *Mazepa V.S.* Influence of precipitation to dynamics of radial growth of conifers at the subarctic regions of Eurasia. *Lesovedenie*, 1999, no. 6, pp. 14–21. (In Russ.).
7. *Manov A.V., Zagirova S.V.* Climate signal in larch tree-ring chronologies at the west macroslope of Polar Urals. *Izv. Ross. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2015, no. 4, pp. 70–77. (In Russ.).
8. *Semenov B.A., Tsvetkov V.F., Chibisov G.A., Elizarov F.P.* *Pritundrovye lesa evropeiskoi chasti Rossii (priroda i vedenie khozyaistva)* [Forest-Tundra of the European part of Russia (nature and farming)]. Arhangel'sk: Knizhnoe Publ., 1998. 332 p.
9. *Smirnov V.V.* *Sezonnyi rost glavneishih drevesnykh porod* [Seasonal Growth of the Main Tree Species]. Moscow: Nauka Publ., 1964. 168 p.
10. *Fiziko-geograficheskoe raionirovanie Severo-Zapada SSSR* [Physico-geographical Regionalization of the North-West of USSR]. Isachenko A.G., Ed. Leningrad: LGU, 1965. 244 p.

11. Tsvetkov V.F., Semenov B.A. *Sosnyaki Krainego severa* [Pine Forests of the Extreme North]. Moscow: Agropromizdat Publ., 1985. 116 p.
12. Agafonov L.I., Gurskaya M.A. The Influence of the Lower Ob River Runoff on Radial Growth of Trees. *Contemporary Problems of Ecology*, 2013, vol. 6, no. 7, pp. 779–787.
13. Biondi F., Waikul K. DENDROCLIM2002: A C++ program for statistical calibration of climate signals in tree-ring chronologies. *Computers & Geosciences*, 2004, no. 30, pp. 303–311.
14. Briffa K.R., Barholin T.S., Eckstein D., Jones P.D., Karlen W., Schweingruber F.H., Zetterberg P. A 1,400-year tree-ring record of summer temperatures in Fennoscandia. *Nature*, 1990, no. 346, pp. 434–439.
15. Briffa K.R., Jones P.D., Schweingruber F.H., Osborn T.J. Influence of volcanic eruptions on northern Hemisphere summer temperature over the past 600 years. *Nature*, 1998, no. 393, pp. 450–455.
16. Briffa K.R., Osborn T.J., Schweingruber F.H., Jones Ph.D., Shiyatov S.G., Vaganov E.A. Tree-ring width and density data around the Northern Hemisphere: Part 2, spatio-temporal variability and associated climate patterns. *The Holocene*, 2002, vol. 12, no. 6, pp. 759–789.
17. *Climate change 2007: the physical science basis*. Contribution of Working Group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. 2007. Cambridge: Cambridge University Press, 996 p.
18. Cook E., Holmes R. *Guide for computer program ARSTAN, Adapted from Users Manual for Program ARSTAN*. Laboratory of Tree-Ring Research, University of Arizona, 1986, pp. 50–65.
19. Cook E.R., Kairiukstis L.A. (Eds). *Methods of dendrochronology. Applications in the environmental sciences*. KluwerAcademic Publ. Dordrecht, 1989. 394 p.
20. Gervais B.R., MacDonald G.M. A 403-Year Record of July Temperatures and Treeline Dynamics of *Pinus sylvestris* from the Kola Peninsula, Northwest Russia. *Arctic, Antarctic, Alpine Res.*, 2000, vol. 32, no. 3, pp. 295–302.
21. Grudd H. Tornetrask tree-ring width and density AD500–2004: a test of climatic sensitivity and a new 1500-year reconstruction of North Fennoscandian summers. *Climate Dynamic*, 2008, vol. 31, pp. 843–857.
22. Guay R. *WinDENDRO 2012: User's Guide*, Regent Instruments. Inc., Quebec, Canada, 2012.
23. Gurskaya M.A., Hallinger M., Eckstein D., Wilmking M. Extreme cold summers in Western Siberia derived from light rings of conifers. *Phyton*, 2012, vol. 52, no. 1, pp. 101–119.
24. Holmes R.L. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bull.*, 1983, no. 43, pp. 69–78.
25. Lopatin E., Kolström T., Spiecker H. Impact of climate change on radial growth of Siberian spruce and Scots pine in North-western Russia. *iForest*, 2008, no. 1, pp. 13–21. doi: 10.3832/ifer0447-0010013.
26. McCarroll D., Loader N.J., Jalkanen R., et al. A 1200-year multiproxy record of tree growth and summer temperature at the Northern pine forest limit of Europe. *The Holocene*, 2013, vol. 23, no. 4, pp. 471–484.
27. Polge H. New investigations on wood by densitometric analysis of radiographs. *Joyce Loebel Rev.*, 1966, vol. 2, no. 2, pp. 9–14.
28. Rinn F. *TSAP Time Series Analysis and Presentation. Version 3.0. Reference Manual*. Heidelberg. 1996. 262 p.
29. Saurer M., Schweingruber F., Vaganov E.A., Shiyatov S.G., Siegwolf R. Spatial and temporal oxygen isotope trends at the Northern tree-line in Eurasia. *Geophys. Res. Lett.*, 2002, vol. 29, no. 9, pp. 71–74.