

УДК 582.475.3:630*552:551.583.4(282.247.11)

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ КЛИМАТИЧЕСКОГО СИГНАЛА В РАДИАЛЬНОМ ПРИРОСТЕ ЕЛИ В БАССЕЙНЕ РЕКИ ПЕЧОРЫ¹

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

^аИнститут биологии Коми НЦ УрО РАН, ул. Коммунистическая, д. 28, Сыктывкар, 167982 Россия

*E-mail: manov@ib.komisc.ru

Поступила в редакцию 22.04.2021 г.

После доработки 18.06.2021 г.

Принята к публикации 06.10.2021 г.

В работе представлено описание статистических зависимостей климатического воздействия на радиальный прирост деревьев ели в сети из шести дендрохронологических участков в ельниках, растущих в разных лесорастительных подзонах Печорского бассейна. Для ели на каждом участке получена обобщенная древесно-кольцевая хронология продолжительностью 127–174 лет, которая отражает локальные особенности ее роста. С помощью кластерного анализа выделена группа обобщенных хронологий со сходными параметрами, включающая притундровые и северотаежные ельники. Отдельно от кластера отстоит хронология ели в более продуктивных среднетаежных ельниках. В пределах кластера ширина годичных колец ели отражает положительный сигнал температуры воздуха в июне и отрицательный сигнал на термические условия вегетационного сезона прошлого года. В конце вегетации на рост стволов ели в толщину положительно влияют атмосферные осадки. В среднетаежных ельниках на фоне слабых неустойчивых климатических сигналов выделяется достоверная отрицательная связь между радиальным приростом ели и температурой воздуха в мае. Использование корреляционных функций со скользящими 15-дневными рядами климатических переменных позволило уточнить временной диапазон влияния изменений температуры воздуха и осадков вегетационного сезона на ширину годичных колец ели. С изменением климатических условий окружающей среды меняются отношения сигнал/климат в древесно-кольцевых хронологиях ели.

Ключевые слова: ель сибирская, радиальный прирост, обобщенная древесно-кольцевая хронология, функция отклика, температура воздуха, атмосферные осадки.

DOI: 10.31857/S0024114822010053

Печорский бассейн — водосборная площадь размером 32.2 млн га — расположен на северо-востоке европейской части России и охватывает часть территории Республики Коми и Ненецкого автономного округа (рис. 1). Северную часть бассейна занимает тундра, большая часть его территории располагается в бореальной зоне. Лесопокрываемая площадь бассейна составляет около 17 млн га, из которой 35% относится к притундровой зоне, 34% — к подзоне северной и 31% — к подзоне средней тайги (Бобкова, 2003). В бассейне р. Печоры расположены самые крупные резерваты темнохвойной тайги на европейском Севере (национальный парк «Югыд ва» и Печоро-Илычский заповедник). Аборигенные леса являются индикатором глобальных природных процессов, поэтому в условиях меняющегося климата нуж-

даются в постоянном мониторинге развития и состояния.

Большинство дендроклиматических исследований посвящены пограничным лесным сообществам, развивающимся в экстремальных экологических условиях на северной и высокогорной границе леса, где радиальный прирост древесных растений лимитирован единственным климатическим фактором — температурой воздуха (Шиятов, 1986; Ваганов и др., 1996; Шишов, 2007; Манов, 2014; Манов, Загирова, 2015 и др.), и на южной границе леса, где он регулируется количеством осадков (Балыбина, 2006; Тишин, 2008; Магда и др., 2011; Матвеев, Тимащук, 2019; Бабушкина, 2020 и др.). С улучшением условий произрастания спектр лимитирующих факторов, определяющих рост деревьев, увеличивается, вследствие чего климатическая составляющая в регулировании ширины годичных колец может проявляться нестабильно. Реакция древесных растений на

¹ Работа выполнена в рамках государственного задания Института биологии Коми НЦ УрО РАН.

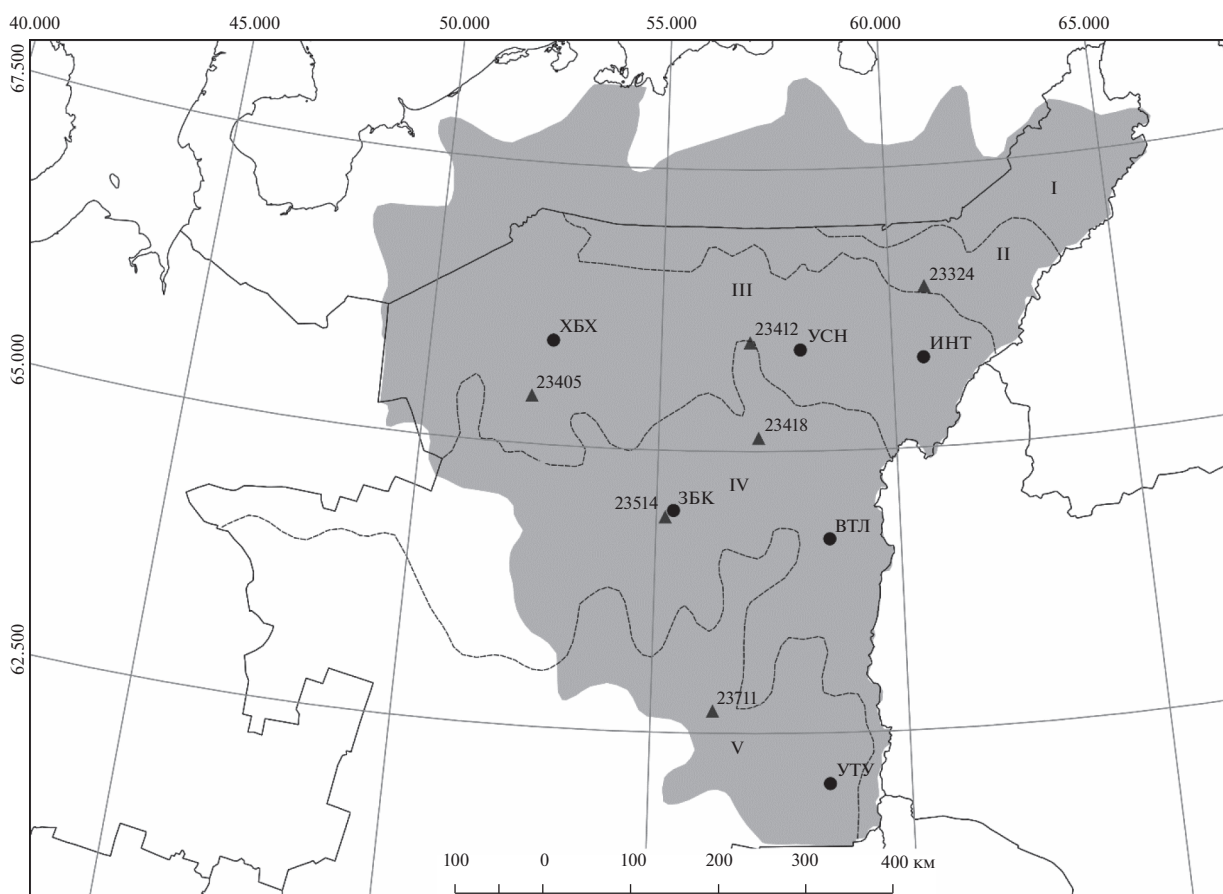


Рис. 1. Карта-схема района исследований. Серая область – территория Печорского бассейна; точка – район сбора образцов древесины; треугольники – ключевые метеостанции; буквами указан код участка, цифрами – синоптический индекс метеостанций: 23405 – Усть-Цильма; 23412 – Усть-Уса; 23324 – Петрунь; 23514 – Ираель; 23418 – Печора; 23711 – Троицко-Печорск. Природные подзоны: I – зона тундр, II – лесотундра, III – притундровая полоса, IV – северная тайга, V – средняя тайга.

окружающую среду в этих условиях во многом определяется их адаптивными способностями (Ваганов, Шашкин, 2000).

Ель сибирская (*Picea obovata* Ledeb.) является доминирующей породой в лесах Печорского бассейна и распространена в таежной зоне и лесотундре (Лесное ..., 2000). Она формирует смешанные по видовому составу разновозрастные древостои, и как эдификатор трансформирует экологические условия для развития подчиненных ярусов растительности. Благодаря своей экологической пластичности ель может развиваться как на песчаных, так и на суглинистых почвах (Коренные ..., 2006). Являясь долговечной и отзывчивой на изменения внешних условий породой, ель хорошо подходит для древесно-кольцевого анализа (Шиятов и др., 2000).

Исследований по выявлению климатического сигнала в радиальном приросте ели в масштабе такого крупного региона Европы с малонарушенными лесами, как Печорский бассейн, до настоящего времени не проводилось. У сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) отклик годовых колец на климатические факторы изучался на локальных территориях бассейна, приуроченных к северному пределу произрастания сосняков лишайниковых (Манов, 2014; Гурская и др., 2017). В верховьях р. Печоры проводились исследования по сопоставлению древесно-кольцевых хронологий сосны с реконструированными пожарами в том же районе (Drobyshev et al., 2004).

Настоящая работа направлена на выявление связей между количественными показателями радиального прироста ныне растущих старых деревьев ели и климата (температура воздуха, осадки), в зависимости от временного периода и лесорастительных условий в Печорском бассейне.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА

Краткая метеорологическая характеристика бассейна реки Печоры представлена по материалам Научно-прикладного справочника ... (1989) и Атласа ... (1997). Отмечено, что большая протя-

женность Печорского бассейна с юга на север (750 км), а в нижнем течении и с запада на восток (700 км), а также различия физико-географических условий создают разные климатические условия региона. Климат бассейна суровый, зима многоснежная, продолжительная, морозная, лето короткое, умеренно теплое, в северных регионах прохладное. Весна и осень длительные, холодные, однако прибрежные районы нижней Печоры из-за больших масс теплой воды, поступающей с юга, долгое время подпитываются теплом. Многоводная река, обширные и многочисленные болота, обилие осадков на фоне слабого испарения обуславливают избыточную влажность климата бассейна. Световой период с июня по июль длится круглые сутки, что обуславливает увеличение суммы ФАР, снижая перепады температуры в течение суток.

На лесной территории Печорского бассейна среднегодовая температура воздуха понижается с юга на север от -1.1 до -3.5°C , годовое количество осадков в этом направлении также снижается от 700 до 500 мм. В горных районах Урала количество осадков доходит до 1500 мм. Переход среднесуточной температуры через 0°C весной в верховьях Печоры наблюдается со второй декады апреля, а на северной границе лесорастительной зоны — с первой декады июня. Продолжительность вегетационного периода (количества дней с температурой воздуха $\geq +5$) в этом регионе составляет 30–40 дней на севере и около 100 дней на юге.

В большинстве районов высоких и средних широт Северного полушария с начала 20-го столетия отмечается потепление климата и слабый рост атмосферных осадков. Не обошли они стороной и Печорский бассейн. Так, севернее 64 параллели норма годовой температуры воздуха повысилась на $0.3\text{--}0.5^{\circ}\text{C}$, а южнее ее — на $0.1\text{--}0.3^{\circ}\text{C}$. Осадки весьма непостоянны в пространстве, считается, что в арктических регионах они увеличиваются каждое десятилетие на $0.5\text{--}1\%$ (McBean et al., 2005).

Большая часть территории Печорского бассейна приходится на низменность с одноименным названием, которая располагается между Тиманским кряжем и Уральским хребтом и простирается на север до Баренцева моря (Атлас ..., 1964).

В растительном покрове Печорского бассейна преобладают хвойные леса (85.3% лесопокрываемой площади), из них 63% занимают ельники. Ель распространена по всей территории бассейна, за исключением площадей с мощными песчаными грунтами.

Лесные сообщества для изучения подбирались на относительно ровном рельефе произрастания, причем самые старые деревья на протяжении жизни не подвергались влиянию антропогенных, эн-

томо-фитопатологических и катастрофических факторов, что могло повлиять на прирост и состояние древостоев.

Дендрохронологический материал собирали в еловых фитоценозах на шести участках, которые распределены по территории Печорского бассейна по широте и долготе (рис. 1). Они располагаются в притундровой зоне и подзонах северной и средней тайги. Каждый участок занимает однородные природно-климатические условия и объединяет близлежащие ельники из одной группы типов леса. Участкам присвоен трехбуквенный код по названиям близлежащих населенных пунктов: ХБХ — с. Хабариха; УСН — г. Усинск; ИНТ — г. Инта; ЗБК — п. Зеленоборск; ВТЛ — г. Вуктыл; УТУ — с. Усть-Унья.

В притундровой зоне расположены дендрохронологические участки ХБХ ($65^{\circ}56'$ с.ш.; $52^{\circ}39'$ в.д.), УСН ($65^{\circ}54'$ с.ш.; $58^{\circ}01'$ в.д.) и ИНТ ($65^{\circ}48'$ с.ш.; $60^{\circ}40'$ в.д.). Участки ХБХ и УСН находятся на Печорской низменности, а участок ИНТ — в предгорьях Приполярного Урала. Растительный покров участков представлен переувлажненными ельниками сфагновой группы типов. Участки ЗБК ($64^{\circ}28'$ с.ш.; $55^{\circ}21'$ в.д.) и ВТЛ ($64^{\circ}13'$ с.ш.; $58^{\circ}33'$ в.д.) расположены в подзоне северной тайги. Западный участок ЗБК находится на территории Печорской низменности и представлен ельниками зеленомошной группы типов, а восточный ВТЛ — в предгорьях на границе Северного и Приполярного Урала — ельниками долгомошной группы. Участок УТУ ($62^{\circ}03'$ с.ш.; $58^{\circ}27'$ в.д.) расположен в подзоне средней тайги в предгорьях Северного Урала и включает в себя ельники зеленомошной группы типов.

В работе были использованы архивы инструментальных метеоданных (<http://aisori-m.meteo.ru/waisori>) с суточным ходом температуры воздуха и атмосферных осадков по ключевым (имеющим длительный, непрерывный период наблюдений), наиболее близко расположенным к дендрохронологическим участкам метеостанциям (рис. 2).

Сбор и подготовку образцов древесины (керна, спилов) для анализа проводили по методикам, принятым в дендрохронологии (Шиятов и др., 2000; Горячев, 2003; Grissino-Mayer, 2003). Измерение ширины годовичных колец и перекрестную датировку образцов древесины выполняли на измерительном приборе LINTAB под биноклем с использованием программ TSAP (Rinn, 1996) и COFCHA (Grissino-Mayer, 2001). Анализ полученных результатов (индивидуальных хронологий) делали в программных пакетах dplR (Bunn, 2008) и treeclim (Zang, Biondi, 2015) из среды R (<https://cran.r-project.org>). Индивидуальные хронологии подвергались стандартизации (расчет индексов прироста) путем использования отрицательной экспоненциальной функции для ис-

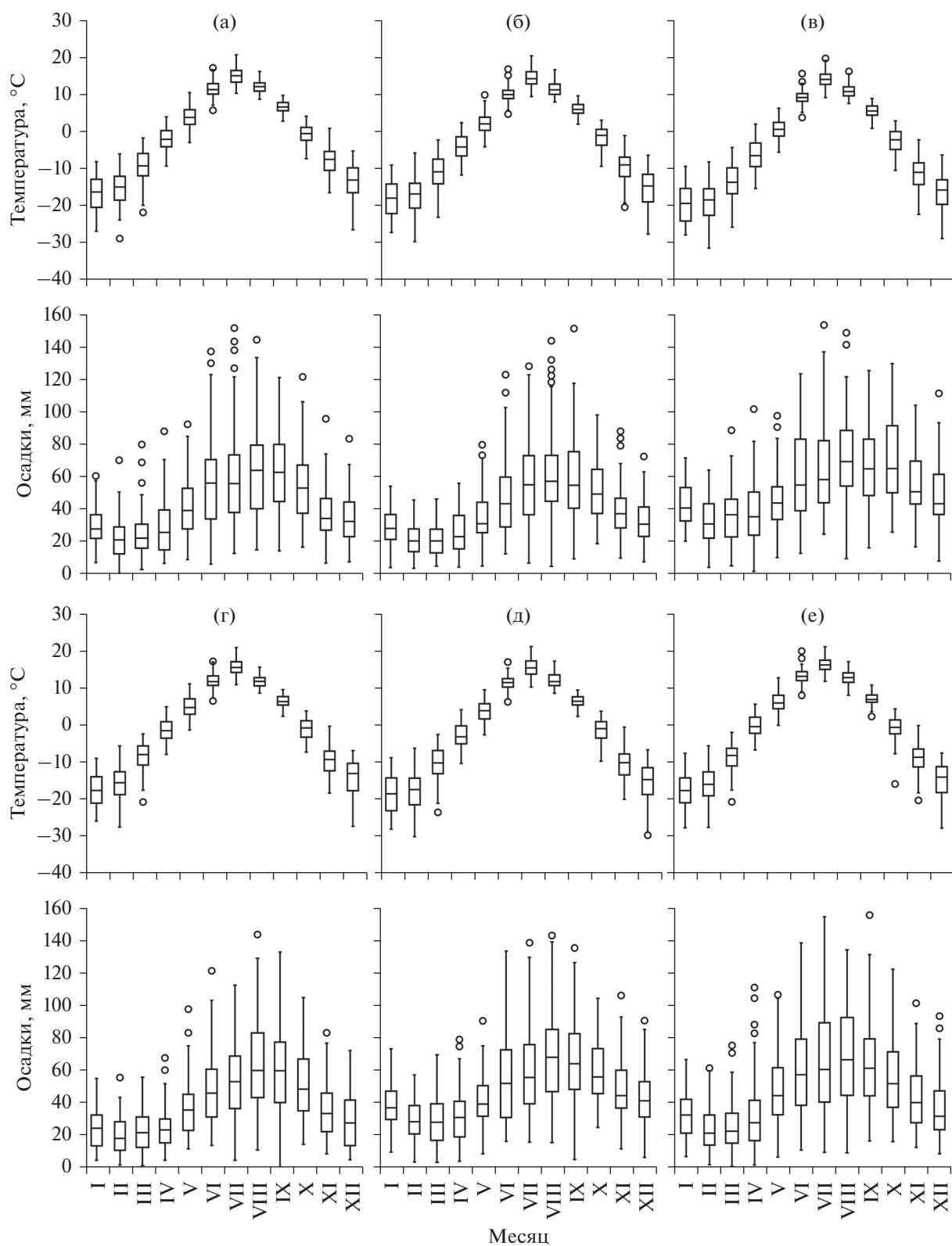


Рис. 2. Климатограммы по данным метеостанций: а – Усть-Цильма (1920–2013); б – Усть-Уса (1936–2014); в – Петрунь (1934–2013); г – Ираель (1960–2015); д – Печора (1944–2014); е – Троицко-Печорск (1893–2018). Прямоугольники – интерквартильный размах; горизонтальные линии – медианы; вертикальные усы – диапазон данных; маркеры – выбросы единичных данных.

ключения неклиматических трендов, а также удаления автокорреляционной зависимости с помощью модели авторегрессии. Полученные остаточные индексы прироста были объединены в обобщенный ряд для каждого участка путем расчета взвешенных средних. Качество древесно-кольцевых хронологий оценивали по их статистическим характеристикам: коэффициенту корреляции Пирсона, среднему коэффициенту чувствительности, автокорреляции первого порядка и общему популяционному сигналу хронологии *EPS*. За пороговую величину *EPS* принято значение 0.85, при которой общая дисперсия ниже этого порога указывает на недопустимое количество шума в хронологиях (Wigley et al., 1984).

Для выявления возможного сходства признаков обобщенных древесно-кольцевых хронологий ели из разных условий местопроизрастания применен метод одиночной связи в кластерном анализе в программном пакете *pvclust* (Suzuki, Shimodaira, 2006) из среды R.

Степень влияния климата на радиальный прирост ели оценивали по показателям функции отклика за период с мая предыдущего года (относительно времени формирования годичного кольца) по сентябрь текущего года. Данный подход основан на получении значений коэффициентов множественной линейной регрессии для климатических переменных отдельных месяцев, статистическая значимость которых проверялась бутстреп-методом (Zang, Biondi, 2015).

Временные интервалы положительных и отрицательных климатических сигналов в радиальном приросте ели определяли для вегетационного периода текущего года (с мая по сентябрь), в течении которого фиксируется максимальный прирост древесины. Для анализа были рассчитаны коэффициенты корреляции Пирсона между климатическими переменными в 15-дневном скользящем окне с шагом 5 дней. Длительный промежуток времени дает возможность фиксирования климатических изменений годичными кольцами (Бенькова и др., 2012).

Стабильность отношений сигнал/климат в древесно-кольцевых хронологиях ели в течение продолжительного времени по каждому месяцу вегетационного периода текущего года оценивали с помощью скользящей корреляционной функции в дендроклиматическом окне с 25-летним интервалом и с шагом 5 лет (Zang, Biondi, 2015). В работах преимущественно используют интервалы скользящего окна от 20 до 35 лет. В пределах рассматриваемого нами периода 1899–2018 гг. 25 и 30-летние интервалы имеют наиболее схожий характер и показывают больше статистически значимых значений корреляции индексов радиального прироста ели с температурами и осадками, чем 20 и 35-летние. Детальной результаты исследования демон-

Таблица 1. Статистические показатели древесно-кольцевых хронологий ели

Код участка	<i>N</i>	<i>r</i>	<i>Sens</i>	<i>Ar1</i>	<i>EPS</i> ≥ 0.85
ХБХ	24	$\frac{0.60}{0.66}$	$\frac{0.30}{0.37}$	$\frac{0.67}{0}$	1856–2013
УСН	12	$\frac{0.71}{0.69}$	$\frac{0.28}{0.35}$	$\frac{0.74}{0}$	1854–2014
ИНТ	28	$\frac{0.61}{0.65}$	$\frac{0.26}{0.31}$	$\frac{0.55}{0}$	1883–2013
ЗБК	37	$\frac{0.54}{0.60}$	$\frac{0.26}{0.31}$	$\frac{0.62}{0}$	1889–2015
ВТЛ	30	$\frac{0.59}{0.64}$	$\frac{0.26}{0.33}$	$\frac{0.71}{0}$	1883–2014
УТУ	30	$\frac{0.60}{0.63}$	$\frac{0.23}{0.29}$	$\frac{0.76}{0}$	1845–2018

Примечание. *N* — число деревьев в хронологии; *r* — межсерийный коэффициент корреляции; *Sens* — коэффициент чувствительности; *Ar1* — автокорреляция первого порядка; *EPS* — общий популяционный сигнал хронологии. В числителе представлены расчеты по стандартным древесно-кольцевым хронологиям, в знаменателе — по остаточным.

стрирует 25-летнее скользящее окно из-за краткости периода времени.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На шести дендрохронологических участках ельников в Печорском бассейне были датированы образцы древесины с 400 вековых деревьев ели. Из них методом перекрестной датировки отобрана 161 индивидуальная древесно-кольцевая хронология, показывающая достаточно высокие межсерийные корреляционные связи (*r*) и чувствительность (*Sens*) к внешним факторам среды (табл. 1). Исключение нами значительного числа датированных образцов древесины ели из работы обусловлено индивидуальностью динамики радиального прироста деревьев в сомкнутых, полидоминантных, разновозрастных древостоях. В относительно благоприятных почвенно-климатических условиях лимитирующие ширину годичных колец факторы, мы полагаем, могут меняться под действием конкурентных взаимоотношений между деревьями, тем самым уменьшая влияние климатических условий на их прирост. Так, с улучшением экологических условий при продвижении с севера на юг теснота связи (*r*) между индивидуальными сериями хронологий и их чувствительность (*Sens*) снижаются, резко увеличивается число деревьев ели, отличающихся неоднородностью динамики прироста ствола по толщине. Во всех дендрохронологических участках отмечаются высокие значения автокорреляции первого порядка (*Ar1*), что свидетельствует о

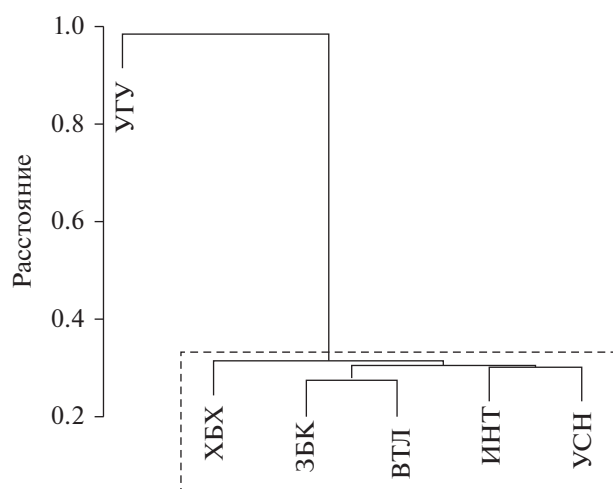


Рис. 3. Дендрограмма кластеризации обобщенных древесно-кольцевых хронологий ели.

связи текущего годовичного прироста древесины ели с погодными условиями прошлых лет. Согласно показателям $EPS \geq 0.85$, древесно-кольцевые хронологии имеют достаточную обеспеченность дендрохронологическими данными. Хорошая согласованность этих индивидуальных рядов позволила объединить их в шесть обобщенных хронологий длительностью от 127 до 174 лет (табл. 1).

По итогам кластерного анализа обобщенных древесно-кольцевых хронологий ели выявлена группа хронологий, объединяющая участки притундровой зоны и северной тайги: ХБХ, УСН, ИНТ, ЗБК и ВТЛ (рис. 3). Отдельно от них отстоит обобщенная хронология участка УТУ, представленная наиболее продуктивными древостоями среднетаежных ельников зеленомошной группы типов. Итоги кластеризации обобщенных хронологий согласуются с результатами функции отклика радиального прироста ели на погодные условия в районах исследований (рис. 4). Степень воздействия температуры воздуха и осадков на радиальный прирост деревьев ели по притундровым и северотаежным дендрохронологическим участкам имеет относительную схожесть. Древесно-кольцевые хронологии в еловых сообществах притундровой зоны (ХБХ, УСН, ИНТ) наиболее чувствительны к июньской температуре и слабее реагируют на июльскую, о чем свидетельствует достоверная положительная связь радиального прироста ели на температуру воздуха летних месяцев (рис. 4, I, а–в). Также положительный отклик на июньскую температуру показывают древесно-кольцевые хронологии подзоны северной тайги на участках ЗБК и ВТЛ, однако отчетливый сигнал июльской температуры в радиальном приросте ели в них отсутствует (рис. 4, I, г, д). Древесно-кольцевая хронология по среднетаежным ельникам на участке УТУ значимые положительные

связи с температурой воздуха не проявляет (рис. 4, I, е). Отрицательное влияние температуры воздуха на радиальный прирост ели возникает в ряде хронологий в весенний и осенний периоды (рис. 4, I, а, г, е). Достоверную отрицательную связь демонстрируют древесно-кольцевые хронологии ели из притундровой зоны и северной тайги (ХБХ, ИНТ, ЗБК, ВТЛ) с температурой воздуха вегетационного периода предыдущего года (рис. 4, I, а, в, г, д). В зимние месяцы участие температуры в ростовых процессах ели не выражено. Сходство во влиянии атмосферных осадков на радиальный прирост ели между дендрохронологическими участками ХБХ, УСН, ИНТ, ЗБК (рис. 4, II, а–г) отмечается лишь в последние месяцы вегетационного периода (август, сентябрь). А прямое влияние зимних осадков на рост взрослых деревьев в многоснежном регионе мы считаем маловероятным.

Как показал анализ функции отклика, климатический сигнал радиального прироста ели проявляется в основном в течение вегетационного периода. Для этого периода при помощи корреляционного анализа были выявлены календарные сроки с положительными и отрицательными связями прирост/климат (рис. 5). Древесно-кольцевые хронологии с дендрохронологических участков притундровой зоны ХБХ, УСН, ИНТ показывают длительный (с середины мая по конец июля), а затем короткий (в середине августа) положительный сигнал на температуру воздуха (рис. 5, а–в). В средней тайге в древесно-кольцевых хронологиях на участках ЗБК и ВТЛ положительный температурный сигнал проявляется слабее, чем в притундровых ельниках (рис. 5, г, д). В радиальном приросте ели с участка УТУ отражается длительный отрицательный климатический сигнал, длящийся до середины июля, и снова он принимает отрицательное значение через 25 дней (рис. 5, е). Реакция радиального прироста ели на атмосферные осадки в продолжение вегетационного сезона слабо согласуется между участками. Лишь с конца июля в большинстве древесно-кольцевых хронологий ели с северных и центральных участков (ХБХ, ИНТ, ЗБК и ВТЛ) проявляется положительный сигнал на осадки (рис. 5, а, в, г, д).

В течение всего анализируемого периода ни одна древесно-кольцевая хронология не проявляет стабильного климатического сигнала (табл. 2). Древесно-кольцевые хронологии ели в условиях Севера на участках ХБХ и ИНТ в притундровой зоне показывают положительный сигнал температуры воздуха июня лишь в начале наблюдений (до 1968 года), а затем он ослабевает до статистически незначимого уровня. Наоборот, у древесно-кольцевых хронологий ели на участках УСН, ЗБК и ВТЛ положительный сигнал температуры июня встречается в последние 40 лет. Древесно-кольце-

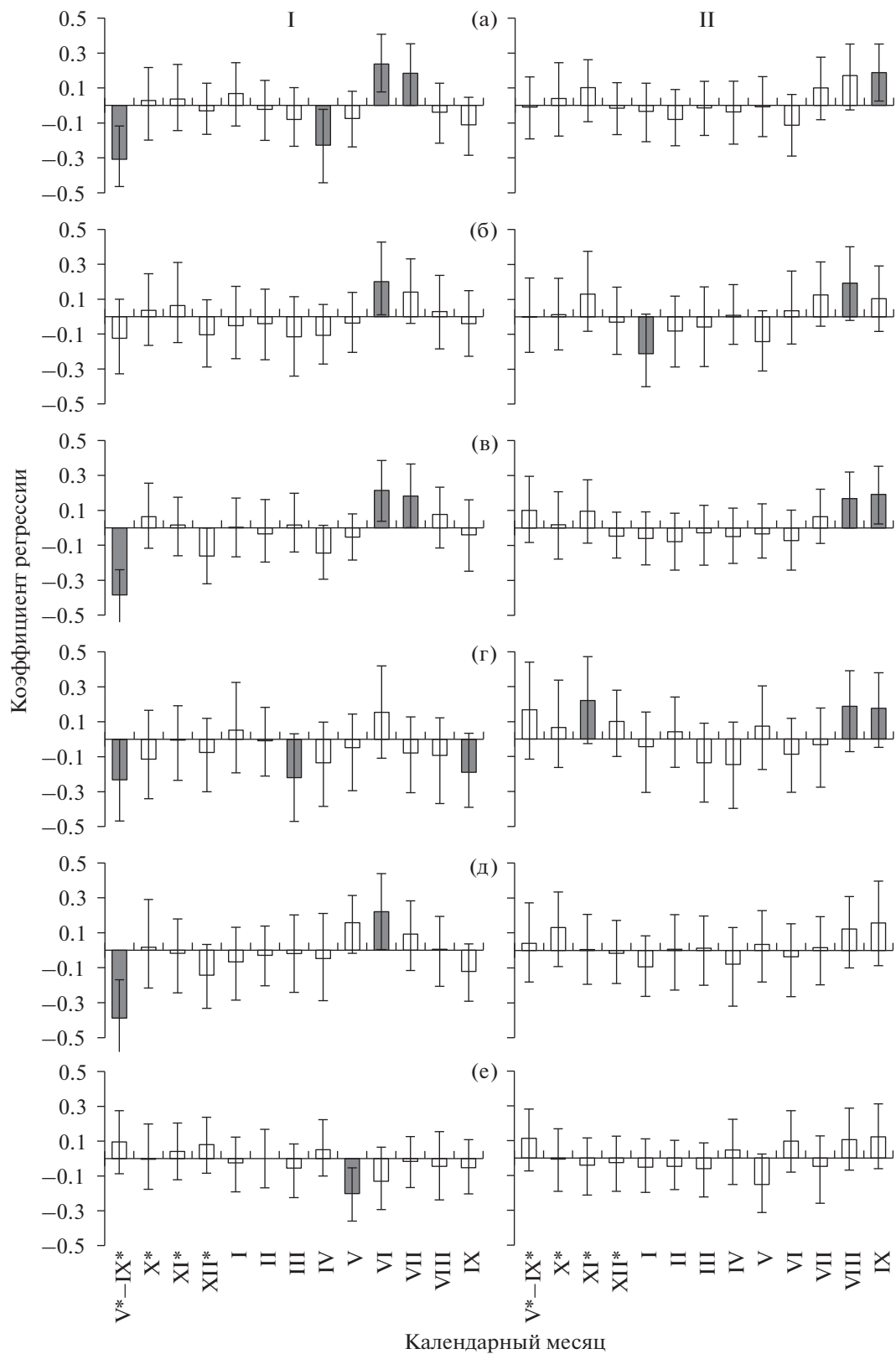


Рис. 4. Функция отклика радиального прироста ели на среднемесячные температуры воздуха (колонка I) и суммы месячных осадков (колонка II) за вегетационный период предыдущего года (V*–IX*) и за период с октября предыдущего года (X*) по сентябрь текущего года (IX). Темные столбцы – уровень значимости $p \leq 0.05$, вертикальные линии – 95%-ный доверительный интервал.

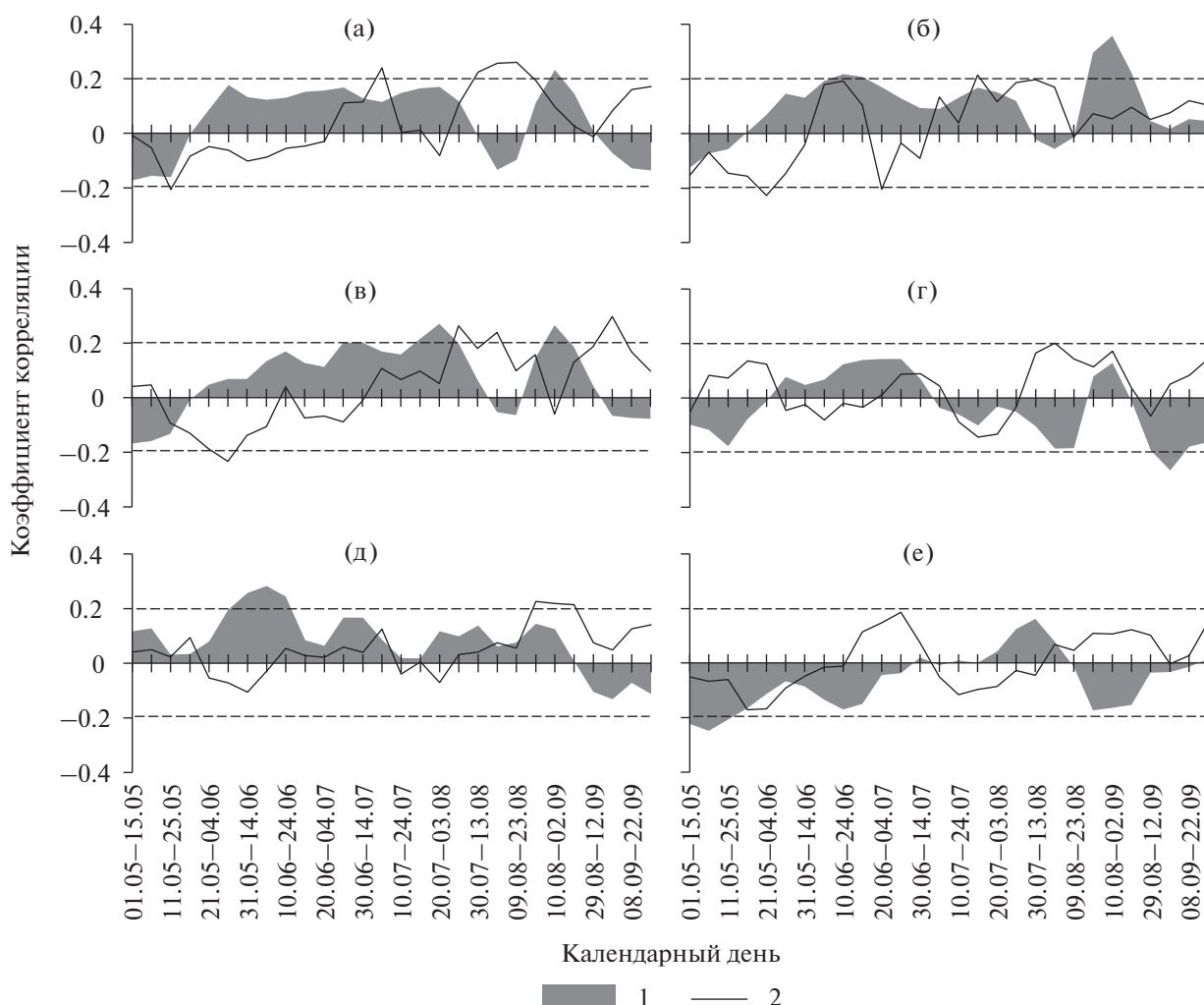


Рис. 5. Корреляция древесно-кольцевых хронологий ели со средней температурой воздуха (1) и суммой осадков (2) в 15-дневном скользящем окне с шагом 5 дней по участкам: а – ХБХ; б – УСН; в – ИНТ; г – ЗБК; д – ВТЛ; е – УТУ. Пунктирные линии указывают на коэффициенты корреляции $r \geq 0.2$ при значимости $p \leq 0.05$.

вая хронология южных районов бассейна (УТМ) имеет отрицательный сигнал температуры мая в начале наблюдений (до 1943 г.). Непрерывное положительное влияние атмосферных осадков на радиальный прирост ели отмечается в августе с 1944 по 1998 гг. в древесно-кольцевых хронологиях на участке ХБХ. В остальных хронологиях осадки имеют кратковременный как положительный, так и отрицательный сигнал.

На большей части территории Печорского бассейна лимитирующим фактором прироста древесины ели является температура воздуха, которая в зависимости от календарной даты может иметь как положительный (вегетационный период текущего года), так и отрицательный (вегетационный период предыдущего года) сигнал. В Северной Европе большинство хронологий ширины годичных колец хвойных деревьев имеют оптимальный положительный сезонный сигнал температуры возду-

ха с июня по август, а в Северной Сибири он короче — с июня по июль (Briffa et al., 2002). В центральной и северной Фенноскандии древесно-кольцевые хронологии ели европейской (*Picea abies* (L.) Karst.) в значительной степени коррелируют с текущей летней температурой, особенно с июньской, сила связи которых увеличивается с юга на север (Mäkinen et al., 2002). А влияние летних атмосферных осадков на радиальный прирост ели в этом регионе имеет слабовыраженный отрицательный сигнал. В лесах Печорского бассейна, приуроченных к притундровой зоне и подзоне северной тайги, ель показывает слабую положительную реакцию прироста по толщине на осадки августа-сентября, что, на наш взгляд, носит локальный характер. Показано, что в бореальном биоклиматическом поясе отсутствует какая-либо пространственная согласованность влияния осадков вегетационного сезона на ширину

Таблица 2. Временная динамика климатического сигнала в радиальном приросте ели за вегетационный период

Год	ХБХ	УСН	ИНТ	ЗБК	ВТЛ	УТУ
1899–1923						– <i>T</i> (V)
1904–1928						– <i>T</i> (V)
1909–1933						– <i>T</i> (V)
1914–1938						– <i>T</i> (V)
1919–1943						– <i>T</i> (V)
1924–1948	+ <i>T</i> (VI, VII)					+ <i>T</i> (VII) – <i>O</i> (VII)
1929–1953	+ <i>T</i> (VI, VII)					– <i>T</i> (VI)
1934–1958	+ <i>T</i> (VI) + <i>O</i> (VII) – <i>O</i> (VI)		+ <i>T</i> (VI, VII)			–
1939–1963	+ <i>T</i> (VI, VIII)	+ <i>O</i> (VII)	+ <i>T</i> (VI)			– <i>T</i> (VI)
1944–1968	+ <i>T</i> (VI) + <i>O</i> (VIII)	+ <i>O</i> (VII)	+ <i>T</i> (VI) + <i>O</i> (IX)			– <i>T</i> (VI)
1949–1973	+ <i>O</i> (VIII)	–	–		–	–
1954–1978	+ <i>O</i> (VIII)	–	–		+ <i>O</i> (IX)	–
1959–1983	+ <i>O</i> (VIII)	+ <i>O</i> (VIII)	–		+ <i>O</i> (VIII)	–
1964–1988	+ <i>O</i> (VIII)	+ <i>O</i> (VIII)	– <i>O</i> (V)	–	+ <i>O</i> (VIII)	+ <i>O</i> (VIII)
1969–1993	–	+ <i>T</i> (VIII)	–	–	+ <i>T</i> (VII, VIII)	+ <i>O</i> (VIII)
1974–1998	+ <i>T</i> (VII) + <i>O</i> (VIII)	– <i>T</i> (IX) + <i>O</i> (IX)	+ <i>O</i> (VIII) – <i>O</i> (V)	+ <i>O</i> (VIII)	+ <i>T</i> (VIII) + <i>O</i> (VIII)	–
1979–2003	+ <i>O</i> (IX)	+ <i>T</i> (VI) – <i>T</i> (IX) + <i>O</i> (VI, IX)	+ <i>O</i> (VIII, IX) – <i>O</i> (V)	– <i>T</i> (IX)	+ <i>T</i> (VI)	+ <i>O</i> (VIII)
1984–2008	– <i>T</i> (IX)	+ <i>O</i> (VI, IX) – <i>O</i> (V)	– <i>T</i> (IX) + <i>O</i> (VIII) – <i>O</i> (V)	– <i>T</i> (IX)	+ <i>T</i> (VI)	–
1989–2013	– <i>T</i> (IX)	+ <i>T</i> (VI) – <i>O</i> (V)	+ <i>T</i> (VII) – <i>T</i> (IX) – <i>O</i> (V)	+ <i>T</i> (VI) – <i>T</i> (IX)	+ <i>T</i> (VI) – <i>T</i> (IX)	–
1994–2018						–

Примечание. В таблице приведены коэффициенты корреляции на уровне $p < 0.05$; в скобках указаны календарные месяцы; *T* – температура воздуха; *O* – осадки; +/– – знаки отклика; – – статистически значимые коэффициенты отсутствуют. Интервалы времени (годы) – скользящее окно шириной 25 лет со смещением 5 лет.

годовых колец хвойных деревьев (Briffa et al., 2002).

Проявление отрицательных связей ширины годовых колец ели с температурой воздуха в весенний период мы связываем с термическими условиями корнеобитаемого слоя почвы. По К.С. Бобковой (1987), в сомкнутом насаждении в условиях средней тайги начало роста корней ели наблюдается при достижении среднесуточной температуры почвы +3...+6°C. В условиях Печорского бассейна ростовые процессы в корнях могут задерживаться до конца мая-начала июня, пока не сойдет снежный покров и температура почвы не повысится до указанных выше величин. Однако

положительные значения среднесуточных температур приземного воздуха начинаются с середины апреля в южной части и с последней декады мая в северо-восточной части бассейна (Атлас, 1997). На наш взгляд, сочетание этих факторов, когда почва еще слабо прогрета, а воздух уже нагрелся до величин, достаточных для начала ростовых процессов, приводит к отрицательному воздействию температурных условий на радиальный прирост деревьев ели в начале вегетационного сезона.

Выявленный нами в большинстве древесно-кольцевых хронологий ели Печорского бассейна отрицательный сигнал на температурные условия прошлогоднего вегетационного сезона был также

отмечен для ели сибирской, произрастающей от Полярного до Северного Урала (Шиятов и др., 1992) и на северной границе леса Западной Сибири (Ваганов и др., 1996). Такой же отрицательный сигнал был выявлен и в некоторых древесно-кольцевых хронологиях ели европейской и сибирской из банка данных (The International Tree-Ring Data Bank) для Европейского Севера России (Мацковский и Соломина, 2011). Отрицательный сигнал встречается в древесно-кольцевых хронологиях ели европейской в Московской области (Липаткин и др., 2007; Мацковский, Соломина, 2011), на юго-западе Германии и юге Финляндии (Mäkinen et al., 2002), а также в хронологиях ели Шренка (*Picea schrenkiana* Fisch. & C.A. Mey) в центральном Тянь-Шане Киргизии (Соломина и др., 2011) и Китая (Wang et al., 2005). Этот единый фактор, влияющий на радиальный прирост елей из разных ареалов обитания, с трудом поддается объяснению. Мы придерживаемся трактовки С.Г. Шиятова и др. (1992) и Н. Mäkinen et al. (2002), которые считают, что отрицательная связь между температурами предыдущего лета и текущим приростом древесины деревьев ели может быть связана с расходом продуктов фотосинтеза на цветение ее в следующем сезоне.

Обнаруженный с помощью корреляционного анализа в 15-ти дневном скользящем окне в древесно-кольцевых хронологиях притундровых ельников положительный температурный сигнал в середине августа, вероятно, отражает период формирования поздней древесины ели, когда еще погода в данном регионе остается довольно теплой. В более южных условиях местообитания на ширину годичных колец ели усиливается влияние конкурентных отношений между растениями за питательные элементы в почве и жизненное пространство, которые, вероятно, заглушают климатический сигнал, что ведет к снижению чувствительности древесно-кольцевых хронологий.

На неустойчивость связи прирост/климат в течение всего периода учета климатических данных по ключевым метеостанциям могла повлиять общая для всей России и всего северного полушария тенденция потепления климата в последние 40 лет и слабое увеличение количества атмосферных осадков (Доклад ..., 2019). Улучшение термических условий в Печорском бассейне должно способствовать усилению температурного сигнала в ширине годичных колец ели. Однако, как показывают наши исследования, это происходит не на всех участках. Наоборот, в притундровой зоне, где сильнее всего должен был проявиться этот сигнал, древесно-кольцевые хронологии в ельниках на участках ХБХ и ИНТ после 1968 года демонстрируют его спад. В последнее время появились суждения об ослаблении реакции радиального прироста деревьев на повышение температуры (Briff et al., 1998). Так, в субарктических районах

Урала и Сибири при потеплении климата в 20–40-е гг. XX в. увеличение прироста деревьев было более синхронным с повышением температуры, чем при потеплении климата в конце этого века (Ваганов и др., 1996). Согласно исследованиям Т.Х. Максимова и Т. Койке (1999), в условиях повышенной температуры воздуха и удвоенной концентрации углекислоты отмечается гомеостатическая приспособленность древесных пород к этим факторам. Авторы указывают, что продукционный процесс растений в условиях возможного потепления климата будет в основном лимитирован эндогенными факторами — устойчивой проводимостью, а также экзогенными — обеспеченностью растений влагой и минеральными органогенами, особенно азотом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Несмотря на то, что бассейн реки Печоры охватывает большую территорию, включающую разные лесорастительные подзоны и типы леса, где продолжительность вегетационного периода варьирует в пространстве, результаты данного исследования показывают наличие единого климатического сигнала в древесно-кольцевых хронологиях — температура воздуха в июне, которая определяет изменчивость радиального прироста деревьев ели в притундровых и северотаежных ельниках.

Авторы выражают благодарность доктору биологических наук Капитолине Степановне Бобковой за ценные советы и обсуждение в ходе подготовки рукописи статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Атлас Коми Автономной Советской Социалистической Республики. М.: ГУТК, 1964. 112 с.
- Атлас Республики Коми по климату и гидрологии. М.: Дрофа; ДиК, 1997. 116 с.
- Бабушкина Е.А. Факторы динамики радиального прироста и структуры годичных колец древесных растений в семиаридных экосистемах Юга Сибири: дис. ... д-ра биол. наук: 03.02.08. Абакан, 2020. 358 с.
- Балыбина А.С. Реконструкция колебаний климата в Предбайкалье дендрохронологическим методом // География и природные ресурсы. 2006. № 4. С. 123–129.
- Бенькова В.Е., Шашкин А.В., Наурзбаев М.М., Прокушкин А.С., Симанько В.В. Значение микроэкологических условий для роста лиственницы Гмелина в экотоне верхней границы леса на полуострове Таймыр // Лесоведение. 2012. № 5. С. 59–70.
- Бобкова К.С. Биологическая продуктивность хвойных лесов Европейского Северо-Востока. Л.: Наука, 1987. 156 с.

- Бобкова К.С. Древесные ресурсы лесов бассейна реки Печоры // География и природные ресурсы. 2003. № 3. С. 92–96.
- Ваганов Е.А., Шиятов С.Г., Мазена В.С. Дендроклиматические исследования в Урало-Сибирской Субарктике. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1996. 246 с.
- Ваганов Е.А., Шашкин А.В. Рост и структура годичных колец хвойных. Новосибирск: Наука, 2000. 232 с.
- Горячев В.М. Подготовка дендрохронологических образцов для измерения под микроскопом // Лесоведение. 2003. № 1. С. 65–77.
- 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 // Известия РАН. Серия географическая. 2018. № 2. С. 59–73.
- Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2018 год. М., 2019. 79 с. http://www.meteorf.ru/upload/pdf_download/o-klimat-rf-2018.pdf
- Коренные еловые леса Севера: биоразнообразие, структура, функции. СПб.: Наука, 2006. 337 с.
- Лесное хозяйство и лесные ресурсы Республики Коми. / Под ред. Г. М. Козубова, А. И. Таскаева. М.: ИПЦ “Дизайн. Информация. Картография”, 2000. 512 с.
- Липаткин В.А., Румянцев Д.Е., Стоноженко Л.В., Коротков С.А., Крылов А.М. Выявление климатической обусловленности в колебаниях радиального прироста методом корреляционного анализа: обсуждение адекватности подхода и причин возникающих затруднений // Дендрохронологическая информация в лесоводственных исследованиях: монография. М.: МГУЛ, 2007. С. 113–124.
- Магда В.Н., Блок Й., Ойдунаа О.Ч., Ваганов Е.А. Выделение климатического сигнала на увлажнение из древесно-кольцевых хронологий в горных лесостепях Алтае-Саянского региона // Лесоведение. 2011. № 1. С. 28–37.
- 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 // Известия Коми научного центра УрО РАН. 2014. Вып. 4(20). С. 43–49.
- Манов А.В., Загирова С.В. Климатический сигнал в древесно-кольцевых хронологиях лиственницы на западном макросклоне приполярного Урала // Известия РАН. Серия географическая. 2015. № 4. С. 70–79.
- Матвеев С.М., Тимащук Д.А. Дендроклиматический анализ 200-летнего древостоя сосны обыкновенной в Воронежском биосферном заповеднике // Лесоведение. 2019. № 2. С. 93–104.
- 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.
- Научно-прикладной справочник по климату СССР. Серия 3. Многолетние данные. Части 1–6. Выпуск 1. Архангельская и Вологодская области, Коми АССР. Книга 1. Л.: Гидрометиздат, 1989. 484 с.
- Соломина О.Н., Долгова Е.А., Максимова О.Е. Реконструкция гидрометеорологических условий последних столетий на Северном Кавказе, в Крыму и на Тянь-Шане по дендрохронологическим данным. М.; СПб.: Нестор-История, 2012. 232 с.
- Тишин Д.В. Дендроклиматические исследования ели финской (*Picea fennica* (REGEL) КОМ.) на южной границе ареала // Ученые записки Казанского государственного университета. 2008. Т. 150. Кн. 4. С. 219–225.
- Шишов В.В., Наурзбаев М.М., Ваганов Е.А., Ивановский А.Б., Корец М.А. Анализ изменчивости радиального прироста древесных растений на территории севера Евразии в последние десятилетия // Известия РАН. Серия географическая. 2007. № 3. С. 49–59.
- Шиятов С.Г., Мазена В.С., Фримтс Г. Влияние климатических факторов на радиальный прирост деревьев в высокогорьях Урала // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. СПб: Гидрометеоиздат, 1992. Т. XIV. С. 125–134.
- Шиятов С.Г., Ваганов Е.А., Кирдянов А.В., Круглов В.Б., Мазена В.С., Наурзбаев М.М., Хантемиров Р.М. Методы дендрохронологии. Часть I. Основы дендрохронологии. Сбор и получение древесно-кольцевой информации: Учебно-методическое пособие. Красноярск: КрасГУ, 2000. 80 с.
- Шиятов С.Г. Дендрохронология верхней границы леса на Урале. М.: Наука, 1986. 136 с.
- 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. V. 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: Part 1, local and regional climate signals // The Holocene. 2002. V. 12. № 6. P. 737–757.
- Bunn A.G. A dendrochronology program library in R (dplR) // Dendrochronologia. 2008. V. 26. № 2. P. 115–124.
- 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. V. 38(1). P. 43–53.
- Grissino-Mayer H.D. Evaluating crossdating accuracy: a manual and tutorial for the computer program COFECHA // Tree-ring research. 2001. V. 57. № 2. P. 205–221.
- Grissino-Mayer H.D. A manual and tutorial for the proper use of an increment borer // Tree-ring research. 2003. Vol. 59. No. 2. P. 63–79.
- Mäkinen H., Nöjd P., Kahle H.-P., Neumann U., Tveite B., Mielikäinen K., Röhle H., Spiecker H. Radial growth variation of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) across latitudinal and altitudinal gradients in central and northern Europe // Forest Ecology and Management. 2002. V. 171. № 3. P. 243–259.
- McBean G., Alekseev G., Chen D., Førland E., Fyfe J., Groisman P.Y., King R., Melling H., Vose R. Arctic: Arctic Climate Impact Assessment // Chapter 2. Arctic climate: past and

present. Cambridge University Press, Cambridge, 2005. P. 21–60.

Rinn F. Tsap version 3.5. Reference Manual. Computer program for tree-ring analysis and presentation. Helenberg, Germany, Frank Rinn, 1996. 264 p.

Suzuki R., Shimodaira H. Pvcust: an R package for assessing the uncertainty in hierarchical clustering // *Bioinformatics*. 2006. V. 22(12). P. 1540–1542.

Wang T., Ren H., Ma K. Climatic signals in tree ring of *Picea schrenkiana* along an altitudinal gradient in the central

Tianshan Mountains, northwestern China // *Trees*. 2005. V. 19. P. 735–741.

Wigley T.M.L., Briffa K.R., Jones P.D. On the average value of correlated time series, with applications in dendrochronology and hydrometeorology // *Journal of climate and applied meteorology*. 1984. V. 23. № 2. P. 201–213.

Zang C., Biondi F. treeclim: an R package for the numerical calibration of proxy-climate relationships // *Ecography*. 2015. V. 38. № 4. P. 431–436.

Spatial-Time Variability of a Climatic Signal in Spruce Radial Growth in Pechora River Basin

A. V. Manov¹,* and I. N. Kutyaev¹

¹*Institute of Biology, Komi Scientific Centre, Ural Branch of the RAS, Kommunisticheskaya st., 28, Syktyvkar, 167982 Russia*

*E-mail: manov@ib.komisc.ru

The paper presents a description of statistical dependences of the climatic impact on the spruce trees' radial growth in a network of six dendrochronological sites in spruce forests growing in different forest-growing sub-zones of the Pechora basin. For each site, a generalized growth ring chronology was obtained for a period of 127–174 years, which reflects the local tree-growth features. Using the cluster analysis, a group of generalized chronologies with similar parameters, including data from sub-tundra and northern taiga spruce forests, was identified. Separately from the cluster is the chronology of spruce in the more productive middle taiga spruce forests. Within the cluster, the width of the spruce annual rings reflects a positive signal of the air temperature in June and a negative signal of the thermal conditions of the growing season of the previous year. At the end of the growing season, precipitation has a positive effect on the spruce trunks' growth in thickness. In middle-taiga spruce forests, against the background of weak unstable climatic signals, a reliable negative relationship between the radial growth of spruce and the air temperature in May stands out. The use of correlation functions with sliding 15-day series of climatic variables made it possible to clarify the time range of the influence of changes in growing season's air temperature and precipitation on the width of spruce growth rings. With the climatic conditions changes, the signal/climate correlations in the tree-ring chronologies of spruce change as well.

Keywords: *Siberian spruce, radial growth, generalized growth-ring chronology, response function, air temperature, atmospheric precipitation.*

Acknowledgements: The work has been carried out within the framework of the State contract with the Institute of Biology of the Komi Scientific Centre of the Ural Branch of the RAS.

REFERENCES

Atlas Komi ASSR (Atlas of Komi Autonomous Soviet Socialist Republic), Moscow: Glavnoe upravlenie geodezii i kartografii Gosudarstvennogo geologicheskogo komiteta SSSR, 1964, 112 p.

Atlas Respubliki Komi po klimatu i gidrologii (Climatic and hydrological atlas of the Republic of Komi), Moscow: Drofa; DiK, 1997, 116 p.

Babushkina E.A., *Faktory dinamiki radial'nogo prirosta i struktury godichnykh kolets drevesnykh rastenii v semiaridnykh ekosistemakh Yuga Sibiri. Diss. d-ra biol. nauk* (Factors of the dynamics of radial growth and the structure of annual rings of woody plants in semiarid ecosystems of southern Siberia. Doctor's biol. sci. thesis), Abakan, 2020, 358 p.

Balybina A.S., *Rekonstruktsiya kolebanii klimata v Predbaikal'e dendrokronologicheskim metodom* (Reconstructing the climate fluctuations in the Prebaikalia using

the dendrochronological method), *Geografiya i prirodnye resursy*, 2006, No. 4, pp. 123–129.

Ben'kova V.E., Shashkin A.V., Naurzbaev M.M., Prokushkin A.S., Siman'ko V.V., *Znachenie mikroekologicheskikh uslovii dlya rosta listvennitsy Gmelina v ekotone verkhnei granitsy lesa na poluostrove Taymyr* (The role of local environmental conditions for Gmelin larch growth in the ecotone of the upper limit of forest growth on Taymyr Peninsula), *Lesovedenie*, 2012, No. 4, pp. 73–84.

Bobkova K.S., *Biologicheskaya produktivnost' khvoynykh lesov evropeiskogo Severo-Vostoka* (Biological productivity of coniferous forests of European North-East), Leningrad: Nauka, 1987, 156 p.

Bobkova K.S., *Drevesnye resursy lesov basseina reki Pechora* (Wood resources of the forests of the Pechora basin), *Geografiya i prirodnye resursy*, 2003, No. 3, pp. 92–96.
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 (dplR), *Dendrochronologia*, 2008, Vol. 26, No. 2, pp. 115–124.
- Doklad ob osobennostyakh klimata na territorii Rossiiskoi Federatsii za 2018 god*, (Report on climate features in the Russian Federation for 2018), Moscow: Rosgidromet, 2019, 79 p, available at: http://www.meteorf.ru/upload/pdf_download/o-klimat-2018.pdf
- 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.
- Goryachev V.M., Podgotovka dendrokronologicheskikh obraztsov dlya izmereniya pod mikroskopom (Preparation of dendrochronological samples for microscopic measurements), *Lesovedenie*, 2003, No. 1, pp. 65–77.
- Grissino-Mayer H.D., A manual and tutorial for the proper use of an increment borer, *Tree-ring research*, 2003, Vol. 59, No. 2, pp. 63–79.
- Grissino-Mayer H.D., Evaluating crossdating accuracy: a manual and tutorial for the computer program COFECHA, *Tree-ring research*, 2001, Vol. 57, No. 2, pp. 205–221.
- Gurskaya M.A., Kukarskikh V.V., Lange E., Rekonstruktsiya temperatury letnikh mesyatsev na osnove godichnykh kolets sosny obyknovnoy *Pinus sylvestris* L., proizrastayushchei v basseine r. Pechora (Reconstruction of summer month temperatures based on Scots pine tree rings (*Pinus sylvestris* L.) growing in the Pechora River basin), *Izvestiya RAN. Seriya geograficheskaya*, 2018, No. 2, pp. 59–73.
- Korennye elovye lesa Severa: bioraznoobrazie, struktura, funktsii* (Virgin spruce forest on North: biodiversity, structure, functions), Saint-Petersburg: Nauka, 2006, 337 p.
- Lesnoe khozyaistvo i lesnye resursy Respubliki Komi* (Forestry and forest resources of the Komi Republic), Moscow: Dizain. Informatsiya. Kartografiya, 2000, 512 p.
- Lipatkin V.A., Rummyantsev D.E., Stonozhenko L.V., Korotkov S.A., Krylov A.M., Vyyavlenie klimaticheskoi obuslovlennosti v kolebaniyakh radial'nogo prirosta metodom korrelyatsionnogo analiza: obsuzhdenie adekvatnosti podkhoda i prichin voznikayushchikh zatrudnenii (Identification of climatic conditionality in fluctuations of radial growth by the method of correlation analysis: discussion of the adequacy of the approach and the reasons for the arising difficulties), In: *Dendrokronologicheskaya informatsiya v lesovodstvennykh issledovaniyakh* (Dendrochronological information in silvicultural research), Moscow: MGUL, 2007, pp. 113–124.
- Magda V.N., Oidupaa O.C., Vaganov E.A., Block J., Extraction of the climatic signal for moisture from tree-ring chronologies of Altai-Sayan mountain forest-steppes, *Contemporary Problems of Ecology*, 2011, Vol. 4, No. 7, pp. 716–724.
- Mäkinen H., Nöjd P., Kahle H.-P., Neumann U., Tveite B., Mielikäinen K., Röhlé H., Spiecker H., Radial growth variation of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) across latitudinal and altitudinal gradients in central and northern Europe, *Forest Ecology and Management*, 2002, Vol. 171, No. 3, pp. 243–259.
- Maksimov T.K., Koike T., Fiziologicheskie aspekty adaptatsii khvoynykh i listvennykh porod derev'ev yakutskoi i yaponskoi populyatsii pri vozmozhnom poteplenii klimata (Physiological aspects of adaptation of coniferous and deciduous trees of the Yakut and Japanese populations with a possible warming of the climate), *Fiziologiya rastenii – nauka 3-go tysyacheletiya* (Plant Physiology – Science of the 3rd Millennium), Moscow, Abstracts of the 4th Congress of the Society of Plant Physiologists, Vol. 1, pp. 412–413.
- Manov A.V., Radial'nyi prirost sosny obyknovnoy v ostrovnym massive bora lishainikovogo Pechorskogo zapolyar'ya (Reconstruction of summer month temperatures based on scots pine tree rings (*Pinus sylvestris* L.), growing in the Pechora River basin), *Izvestiya Komi nauchnogo tsentra UrO RAN*, 2014, No. 4(20), pp. 43–49.
- Manov A.V., Zagirova S.V., Klimaticheskii signal v drevesno-kol'tsevykh khronologiyakh listvennitsy na zapadnom makrosklone pripolyarnogo Urala (Climatic signal in tree-ring chronologies of larch on the western macroslope of the Sub-Polar Urals), *Izvestiya RAN. Seriya geograficheskaya*, 2015, No. 4, pp. 70–79.
- Matskovskii V.V., Solomina O.N., Klimaticheskii signal v shirine godichnykh kolets khvoynykh derev'ev na severe i v tsentre Evropeiskoi Rossii (Climatic signal in tree-ring width of conifers in the north and centre of European Russia), *Problemy ekologicheskogo monitoringa i modelirovaniya ekosistem*, 2011, Vol. XXIV, pp. 256–270.
- Matveev S.M., Timashchuk D.A., Dendroclimatic assessment of a 200-year-old Scots pine stand in the Voronezh Biosphere Reserve, *Contemporary Problems of Ecology*, 2019, Vol. 12, No. 7, pp. 682–691.
- McBean G., Alekseev G., Chen D., Førland E., Fyfe J., Groisman P.Y., King R., Melling H., Vose R., Arctic: Arctic Climate Impact Assessment, In: *Arctic climate: past and present*, Cambridge: Cambridge University Press, 2005, pp. 21–60.
- Nauchno-prikladnoi spravochnik po klimatu SSSR. Seriya 3. Mnogoletnie dannye* (Research and practical handbook on climate of the USSR. Series 3. Long-term data), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1988, Parts 1–6, Vol. 1, Arkhangelsk and Vologda regions, Komi ASSR, 693 p.
- Rinn F., *Tsap version 3.5. Reference Manual. Computer program for tree-ring analysis and presentation*, Helenberg, Germany, Frank Rinn, 1996, 264 p.
- Shishov V.V., Naurzbaev M.M., Vaganov E.A., Ivanovskii A.B., Korets M.A., Analiz izmenchivosti radial'nogo prirosta drevesnykh rastenii na territorii severa Evrazii v poslednie desyatiletia (The analysis of tree-ring growth on Eurasian North at the last decades), *Izvestiya RAN. Seriya geograficheskaya*, 2007, No. 3, pp. 49–59.
- Shiyatov S.G., *Dendrokronologiya verkhnei granitsy lesa na Urale* (Dendrochronology of the upper limit of forests in Urals), Moscow: Nauka, 1986.
- Shiyatov S.G., Mazepa V.S., Fritts G., Vliyanie klimaticheskikh faktorov na radial'nyi prirost derev'ev v vysokogor'yakh Urala (The influence of climatic factors on the radial growth of trees in the high mountains of the Urals), In: *Problemy ekologicheskogo monitoringa i modelirovaniya ekosistem* (Challenges of ecological monitoring and model-

- ing of ecosystems), Saint Petersburg: Gidrometeoizdat, 1992, Vol. XIV, pp. 125–134.
- Shiyatov S.G., Vaganov E.A., *Metody dendrokronologii. Osnovy dendrokronologii. Sbor i poluchenie drevesskol'tsevoi informatsii* (Methods of dendrochronology. Fundamental of dendrochronology. Collection of data from tree-rings), Krasnoyarsk: Izd-vo KrasGU, 2000, Vol. 1, 80 p.
- Solomina O.N., Dolgova E.A., Maksimova O.E., *Rekonstruktsiya gidrometeorologicheskikh uslovii poslednikh stoletii na Severnom Kavkaze, v Krymu i na Tyan'-Shane po dendrokronologicheskim dannym* (Reconstruction of hydrology and weather of recent centuries in Northern Caucasus, Crymea and Tyan-Shan from dendrochronological data), Moscow-Saint-Petersbourg: Nestor-Istoriya, 2012, 231 p.
- Suzuki R., Shimodaira H., Pvcust: an R package for assessing the uncertainty in hierarchical clustering, *Bioinformatics*, 2006, Vol. 22(12), pp. 1540–1542.
- Tishin D.V., Dendroklimaticheskie issledovaniya eli finskoi (*Picea fennica* (REGEL) KOM.) na yuzhnoi granitse areala (Dendroclimatic studies of Finnish spruce (*Picea fennica* (REGEL) KOM.) At the southern border of the range), *Uchenye zapiski Kazanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2008, Vol. 150, No. 4, pp. 219–225.
- Vaganov E.A., Shashkin A.V., *Rost i struktura godichnykh kolets khvoinykh* (Growth and structure of coniferous tree-rings), Novosibirsk: Nauka, 2000, 232 p.
- Vaganov E.A., Shiyatov S.G., Mazepa V.S., *Dendroklimaticheskie issledovaniya v Uralo-Sibirskoi Subarktike* (Dendroclimatic studies in the Ural-Siberian subarctic zone), Novosibirsk: Nauka, 1996, 244 p.
- Wang T., Ren H., Ma K., Climatic signals in tree ring of *Picea schrenkiana* along an altitudinal gradient in the central Tianshan Mountains, northwestern China, *Trees*, 2005, Vol. 19, pp. 735–741.
- 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 applied meteorology*, 1984, Vol. 23, No. 2, pp. 201–213.
- Zang C., Biondi F., treeclim: an R package for the numerical calibration of proxy-climate relationships, *Ecography*, 2015, Vol. 38, No. 4, pp. 431–436.