

## Климатический отклик радиального прироста хвойных в лесостепи юга Сибири: сравнение трех подходов

Л. В. БЕЛОКОПЫТОВА<sup>1</sup>, Е. А. БАБУШКИНА<sup>1</sup>, Д. Ф. ЖИРНОВА<sup>1</sup>,  
И. П. ПАНЮШКИНА<sup>2</sup>, Е. А. ВАГАНОВ<sup>3,4</sup>

<sup>1</sup> Хакасский технический институт – филиал Сибирского федерального университета  
655017, Абакан, ул. Щетинкина, 27  
E-mail: white\_lili@mail.ru

<sup>2</sup> Лаборатория исследования годичных колец, Аризонский университет  
85721, США, Тусон, штат Аризона, ул. Е. Ловелла, 1215

<sup>3</sup> Сибирский федеральный университет  
660041, Красноярск, просп. Свободный, 79

<sup>4</sup> Институт леса им. В. Н. Сукачева, ФИЦ КНЦ СО РАН  
660036, Красноярск, Академгородок, 50/28

Статья поступила 23.01.2018

Принята к печати 04.02.2018

### АННОТАЦИЯ

Для хронологий радиального прироста *Pinus sylvestris* и *Larix sibirica* в лесостепной зоне Южной Сибири, где наблюдается комплексное влияние температуры и осадков на прирост, проведено сравнение трех подходов к исследованию климатического отклика: парные корреляции хронологий с ежемесячными рядами климатических переменных; парные и частные корреляции с ежемесячными и более длительными рядами основного и вторичного климатического фактора, рассчитанные в специализированной программе Seascorr; парные корреляции со скользящими 15-дневными рядами климатических переменных. Сравнение расчетов показало, что парные корреляции с ежемесячными рядами, являясь наиболее простым подходом, могут использоваться для широкого круга дендроклиматических исследований как в качестве основного инструмента, так и для предварительного анализа. Seascorr-анализ наиболее пригоден для оценки климатических связей прироста в наиболее экстремальных условиях и реконструкции, например, сильных засух и длительности их воздействия. Применение 15-дневных скользящих рядов ограничено наличием суточных климатических данных, но позволяет уточнить временной диапазон влияния текущих условий на рост деревьев. Сочетание всех трех подходов позволило более полно выявить пространственно-временные закономерности и оценить видоспецифичность климатического отклика прироста хвойных деревьев.

**Ключевые слова:** радиальный прирост, *Pinus sylvestris*, *Larix sibirica*, климатический отклик, лесостепь.

Изменчивость прироста деревьев определяется комплексом экологических факторов, среди которых в высоких и умеренных ши-

ротах важную роль играют климатические переменные. Вследствие этого радиальный прирост деревьев является важным источником

косвенных данных об окружающей среде, включая климат [Fritts, 1976; Vaganov et al., 2006]. Его длительные хронологии могут использоваться для реконструкции климатических факторов в прошлом за пределами инструментальных и исторических данных [Cook et al., 2007; Touchan et al., 2007; Yang et al., 2014; De Rose et al., 2015], моделирования процессов роста и развития древесных растений [Fulé, 2010; Vaganov et al., 2011], оценки состояния растительности [Cortina et al., 2006; Laughlin, Grace, 2006], прогнозирования динамики климатических факторов и состояния лесных экосистем в будущем [Pan, Raynal, 1995; Tessier et al., 1998; Goldblum, Rigg, 2005].

В настоящее время наиболее полно исследованы дендроклиматические взаимосвязи в высокогорных и субарктических районах (верхняя и северная границы леса) из-за преобладания влияния единственного лимитирующего климатического фактора – температуры первой половины вегетационного сезона, определяющей прирост на 60–80 % [Шиятов, 1986; Ваганов и др., 2000; Шишов и др., 2007; и др.]. В менее экстремальных условиях наблюдается совместное значимое влияние нескольких лимитирующих факторов, включая и локальные условия [Fritts, 1976; Schweingruber, 1996; Panyushkina et al., 2005; Moser et al., 2010; Seim et al., 2016]. С другой стороны, даже при лимитировании одним фактором анализ его влияния может затрудняться отсутствием непосредственных инструментальных данных. Такая картина характерна для засушливых регионов, где рост растений ограничен влажностью почвы. Однако ввиду отсутствия длительных рядов ее измерений анализ проводится для факторов среды, в той или иной степени влияющих на влажность – температуры, осадков, высоты снежного покрова, индексов засухи и др. [Pederson et al., 2001; Meko et al., 2013; Belmecheri et al., 2016; Hou et al., 2016]. Кроме того, реакция древесных растений на условия среды при усложнении механизмов лимитирования в большей степени зависит от видоспецифичных механизмов их адаптации [Ваганов, Шашкин, 2000; Wilson, Elling, 2003; Friedrichs et al., 2009].

За всю историю дендроклиматического анализа его методологический аппарат прошел существенное развитие. Классическим,

наиболее широко распространенным инструментом для анализа служат парные коэффициенты корреляции Пирсона между хронологиями радиального прироста и климатическими рядами данных по отдельным месяцам за весь период покрытия рядов инструментальных климатических данных [Pederson et al., 2001; Slimani et al., 2014; Maxwell, 2016; Opała et al., 2016; Restaino et al., 2016; Cavin, Jump, 2017; Rozas, Olano, 2017]. Для учета воздействия на прирост деревьев нескольких факторов в эту методику со временем вносились различные изменения и дополнения. Так, на основе ежемесячных климатических данных рассчитывают и используют в анализе усредненные или суммированные ряды для более длительных периодов (сезон, год и т. д.). При этом чаще всего рассматривают конкретные периоды, полученные на основе результатов анализа ежемесячных рядов [Wang et al., 2016; Cai, Liu, 2017; Opała et al., 2017]. Однако подбор этих диапазонов только по результатам анализа ежемесячных данных не всегда очевиден, в таких случаях более полную и точную картину позволяет получить “сплошной” перебор диапазонов различной длительности – от месяца до года и более [Kurz-Besson et al., 2016; Tejedor et al., 2017].

При проведении исследований в регионах, где характерно сочетание двух, часто взаимосвязанных, лимитирующих факторов (например, температуры и осадков), проводится их ранжирование по силе воздействия на прирост, и отклик на вторичный фактор оценивается частными коэффициентами корреляции, т. е. с учетом воздействия первичного фактора, для которого используются парные коэффициенты [Meko et al., 2013; Touchan et al., 2014; Lavergne et al., 2015; Shah et al., 2015; Coulthard, Smith, 2016]. Существуют специализированные компьютерные программы, позволяющие автоматизировать тот или иной алгоритм дендроклиматического анализа, например, программа *Seascore* (модуль для MATLAB), разработанная в Лаборатории исследований годичных колец Аризонского университета [Meko et al., 2011].

В последнее время в дендроклиматическом анализе, чаще всего для параметров анатомической структуры годичных колец, применяются также скользящие периоды усредне-

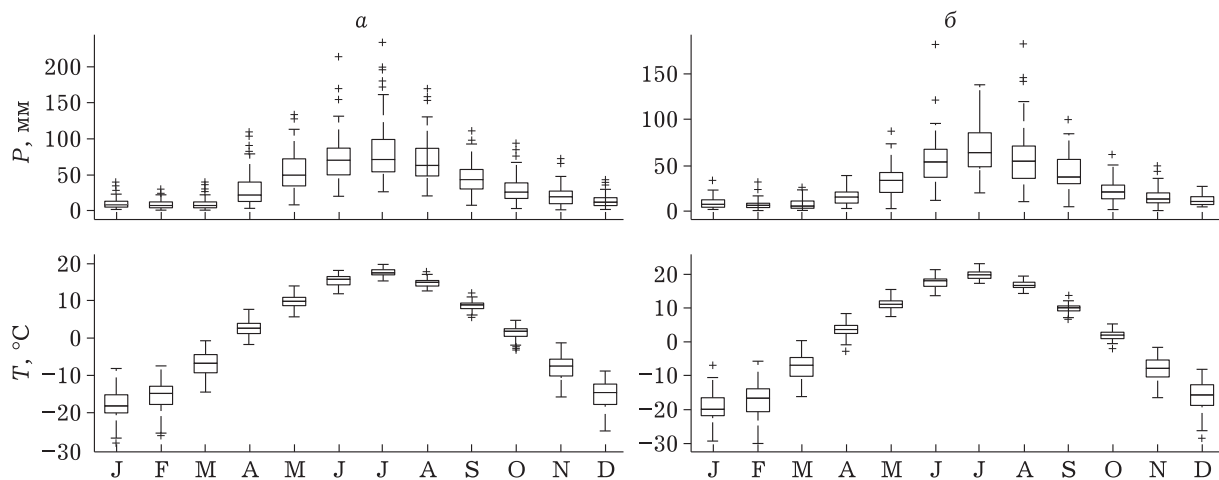


Рис. 1. Климатограммы по данным метеостанций (1936–2012 гг.): а – Таштып; б – Минусинск. Горизонтальные линии – медианы, прямоугольники – интерквартильный размах, отрезки – диапазон данных без выбросов, маркеры – выбросы

ния климатических факторов длительностью 5–15 дней, полученные на основе суточных рядов [Panyushkina et al., 2003; Бабушкина и др., 2010; Liang et al., 2013; Carrer et al., 2017].

Таким образом, одной из первоочередных задач дендроклиматологии является подбор алгоритма исследований в зависимости от конкретной цели и особенностей природных условий региона. Одним из интересных, но относительно малоизученных с точки зрения дендроклиматического анализа регионов является юг Сибири, где в связи с разнообразием рельефа на небольшой площади можно наблюдать широкий спектр природных зон и видового состава растительности [Chytry et al., 2008; Макунина, 2016; Polyakova et al., 2016]. В частности, в лесостепной зоне этого региона наблюдается комплексное лимитирование прироста деревьев температурами и осадками как текущего, так и предыдущего сезона. Поэтому представляло интерес на примере этого региона рассмотреть и сравнить несколько различных алгоритмов дендроклиматического анализа, а также возможности их совместного использования для выявления пространственно-временных закономерностей и оценки видоспецифичности в климатическом отклике прироста древесных растений.

#### МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

**Район исследования.** Материал собирали в лесостепной зоне на западной границе Ха-

касско-Минусинской котловины, в предгорьях Кузнецкого Алатау, на двух участках: KAZ (53°23' с. ш., 90°05' в. д., 685 м над ур. м.) – в окрестностях с. Казановка в Аскизском р-не Хакасии, в предгорьях Абаканского хребта в бассейне р. Аскиз; VID (54°00' с. ш., 91°01' в. д., 660 м над ур. м.) – в окрестностях с. Вершино-Биджа вблизи верховий р. Биджа, на южном макросклоне Батеневского кряжа. Оба участка заложены на южном склоне крутизной 15–20° и представляют собой разреженный лиственнично-сосновый лес на горных серых лесных почвах.

В качестве источников климатических данных за период 1936–2012 гг. выбрали метеостанции Таштып (№ 29956, 52°48' с. ш., 89°53' в. д., 655 м над ур. м.) и Минусинск (№ 29866, 53°41' с. ш., 91°40' в. д., 251 м над ур. м.) для участков KAZ и VID соответственно (рис. 1). Климат района исследования резко континентальный, характеризующийся коротким жарким летом, продолжительной и холодной малоснежной зимой. Среднеголетняя годовая сумма осадков около 340 мм на равнине и около 450 мм в предгорьях, причем большая часть выпадает в период с апреля по октябрь с максимумом в июле. С июня по сентябрь наблюдаются отрицательные корреляции температуры и осадков ( $r = -0,23 \dots -0,41$ ;  $p < 0,05$ ), что характерно для климата Юга Сибири [Баженова, Тюменцева, 2010]. В работе использовали ежемесячные средние температуры и суммы осадков,

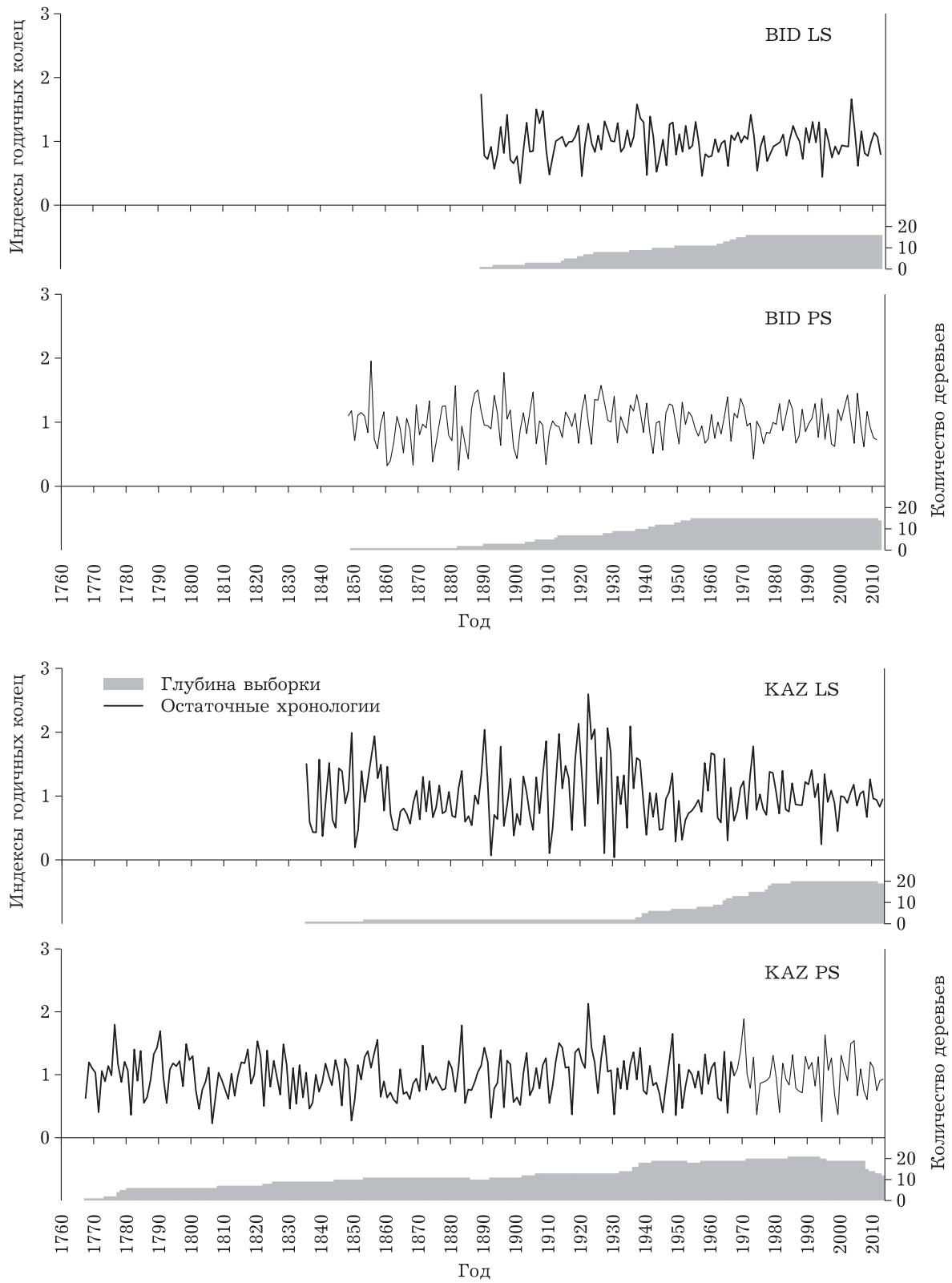


Рис. 2. Графики хронологий радиального прироста с указанием количества деревьев для каждого года

а также скользящие 15-дневные средние температуры и суммы осадков с шагом 1 день, рассчитанные на основе суточных данных.

**Хронологии радиального прироста.** На каждом участке брали керны 15–20 живых деревьев сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L. – PS) и лиственницы сибирской (*Larix sibirica* Ledeb. – LS). Выбор деревьев, сбор и обработку образцов древесины, измерение радиального прироста, датировку и стандартизацию хронологий проводили с помощью стандартных дендрохронологических методов [Methods..., 1990] с использованием измерительной установки LINTAB 5, программ TSAPWin, COFECHA и ARSTAN [Holmes, 1998; Cook, Krusic, 2005; Rinn, 2011]. В работе использовали остаточные локальные хронологии (рис. 2), т. е. хронологии, полученные после удаления возрастного тренда, представленного в виде отрицательной экспоненциальной функции, удаления автокорреляционной зависимости и усреднения по участку и виду. При построении хронологий рассчитаны их статистические характеристики за период 1936–2012 гг.: среднее значение ширины годичных колец, стандартное отклонение исходной и остаточной хронологии, автокорреляция первого порядка исходной хронологии, средний коэффициент чувствительности, средний межсерийный коэффициент корреляции и выраженный сигнал популяции остаточной хронологии [Methods..., 1990].

**Дендроклиматический анализ** радиально-го прироста сосны и лиственницы проводили с использованием трех подходов. В классическом подходе степень влияния климатических факторов на прирост первоначально оценивали парными коэффициентами корреляции Пирсона [Pearson, 1895] остаточных хронологий с ежемесячными климатическими рядами с июля предыдущего года (относительно формирования годичного кольца) по август текущего года. Затем провели “сплошной” перебор для всех диапазонов длительностью от двух до 12 мес. [Kurz-Besson et al., 2016; Tejedor et al., 2017].

При подходе, учитывающем взаимодействие между климатическими переменными, для основного лимитирующего фактора рассматривали парные корреляции, для вторич-

ного фактора – частные корреляции (т. е. корреляции после удаления влияния основного фактора за соответствующий период). На практике для расчета частного коэффициента корреляции  $r_{x_2, x_3 | x_1}$  между переменными  $x_2$  и  $x_3$  с учетом влияния переменной  $x_1$  находят простые линейные регрессии  $x_2(x_1)$  и  $x_3(x_1)$  и вычисляют парные корреляции остатков от них, т. е. результатов вычитания регрессионной функции из исходной переменной. При дендроклиматическом анализе в качестве переменной  $x_1$  выступает первичный климатический фактор,  $x_2$  – вторичный климатический фактор и  $x_3$  – хронология радиального прироста. Эти расчеты проводили в программе Seascorr [Meko et al., 2011]. Алгоритм расчетов в данной программе включает также анализ диапазонов большей длительности.

Третий подход, использованный в работе – анализ отклика хронологий прироста на скользящие 15-дневные (с шагом 1 день) ряды климатических переменных с использованием парных коэффициентов корреляции Пирсона для всего периода покрытия инструментальных данных [Liang et al., 2013; Carrer et al., 2017].

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Статистические характеристики использованных в работе хронологий за период инструментальных климатических наблюдений (1936–2012 гг.) приведены в таблице. Средний радиальный прирост составил 1–1,7 мм, наименьшее значение наблюдается у сосны KAZ PS. Эта же хронология имеет меньшее стандартное отклонение и автокорреляцию. Статистические характеристики всех хронологий достаточно высоки для использования в дендроклиматическом анализе. На участке KAZ хронологии имеют большую чувствительность, чем на участке VID. В пределах каждого участка корреляции между хронологиями двух видов за этот же период составляют  $r = 0,66–0,67$ , между участками для хронологий одного вида  $r = 0,28–0,45$  ( $p < 0,01$ ). Наименьшее сходство ( $r = 0,17$ ;  $p = 0,096$ ) наблюдается между VID PS и KAZ LS.

При использовании классического подхода дендроклиматический анализ показал сле-

**Статистические характеристики измеренных и остаточных локальных хронологий радиального прироста**

Статистическая характеристика	KAZ LS	KAZ PS	BID LS	BID PS
Количество деревьев $N$	20	21	16	15
Измеренные хронологии				
Средний прирост мм	1,632	1,061	1,593	1,696
Стандартное отклонение мм	0,809	0,418	0,678	0,598
Автокорреляция первого порядка	0,531	0,295	0,722	0,685
Остаточные хронологии				
Стандартное отклонение	0,467	0,353	0,239	0,252
Средний межсерийный коэффициент корреляции	0,712	0,589	0,526	0,606
Средний оценочный сигнал популяции	0,948	0,959	0,918	0,946
Средний коэффициент чувствительности	0,514	0,447	0,295	0,308

дующие результаты (рис. 3). Типичная для засушливых регионов комбинация положительного отклика на осадки и отрицательного – на температуру наблюдается на участке KAZ для июля – сентября предыдущего и апреля – июня текущего года, на участке BID – для июля – сентября предыдущего и апреля – июля текущего года. Для месяца, когда формируется устойчивый снежный покров (ноябрь) отмечается слабое положительное влияние температур и осадков на при-

рост лиственницы, но уровень значимости этих коэффициентов корреляции находится на пределе  $p \approx 0,05$ . При этом для прироста сосны значимым оказывается только количество осадков этого периода.

При использовании в классическом подходе диапазонов обобщения климатических факторов длительностью 2–12 мес. (рис. 4) заметно, что для сосны и лиственницы картина практически не отличается, а отличия между участками существенны. На участке

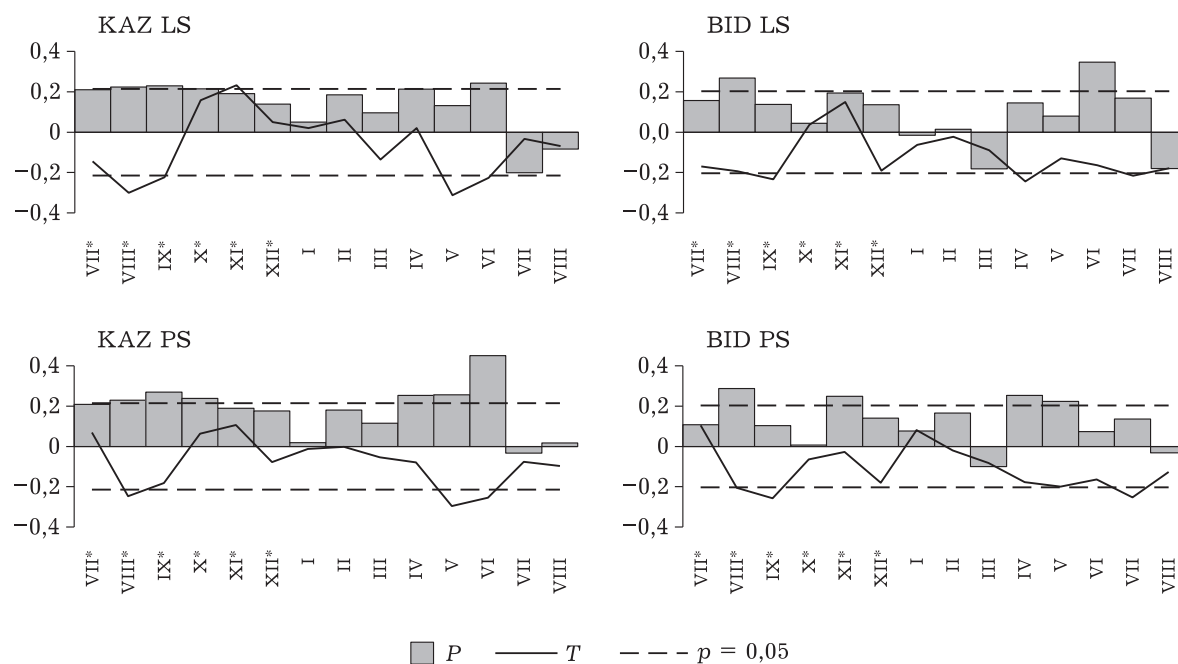


Рис. 3. Парные корреляции хронологий с ежемесячными климатическими рядами. Звездочкой помечены месяцы предыдущего года

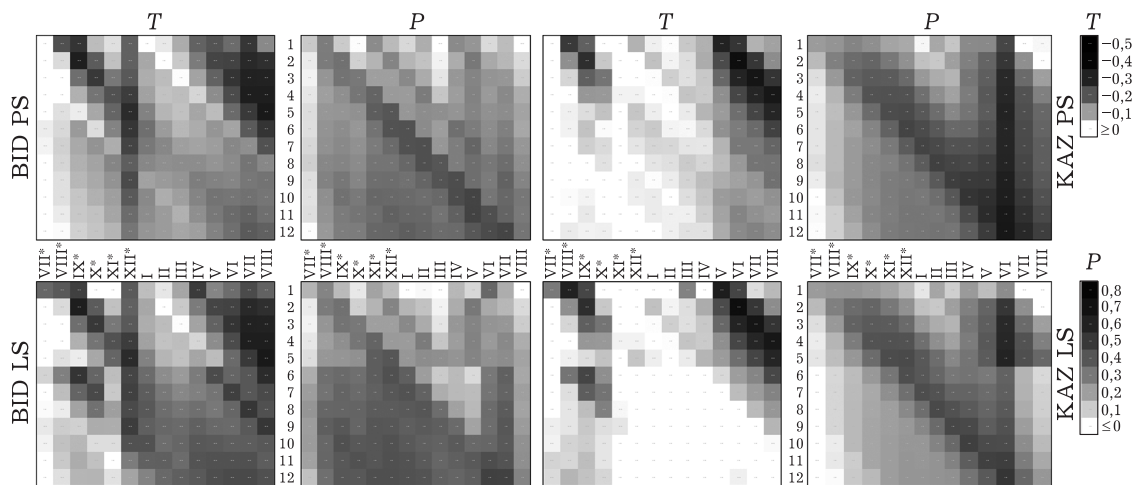


Рис. 4. Парные корреляции хронологий с климатическими рядами, обобщенными за 1–12 мес. (вертикальная ось), последний месяц диапазона обобщения указан на горизонтальной оси. Для температур показаны только отрицательные корреляции, для осадков – только положительные. Коэффициенты корреляции, превышающие 0,214, значимы на уровне  $p < 0,05$

ВІD сильно выражена отрицательная реакция прироста на температуру в диапазонах с апреля по июль – август текущего года, с августа по сентябрь и с августа по декабрь предыдущего года. Отклик на осадки имеет выраженный максимум для годового диапазона с августа предыдущего по июль текущего года. Но диапазон с июля предыдущего по июнь текущего года имеет почти такую же высокую интенсивность, т. е. можно говорить о влиянии осадков с июля предыдущего по июль текущего года. На участке KAZ реакция на температуру слабее, максимумы наблюдаются в диапазонах август – сентябрь предыдущего и май – июль или май – июль текущего года. Отклик прироста на осадки, напротив, выражен сильнее с максимумами для диапазона с июля предыдущего по июнь текущего года и для февраля – июня.

При подходе, учитывающем возможные взаимодействия между температурой и осадками, использовали Seacorr [Meko et al., 2011]. Осадки выбраны в качестве ведущего климатического фактора, поскольку в районе исследования они оказывают более выраженное и устойчивое воздействие на прирост хвойных. Расчеты климатического отклика для диапазонов различной длины показали, что на обоих участках отклик на температуру наиболее выражен для длительности диапазона усреднения 4 мес., а на осадки – при

суммировании за 12 мес. (рис. 5). Картина отклика на осадки совпадает с результатами первого подхода, так как Seacorr для ведущего фактора рассчитывает парные коэффициенты корреляции. Использование частных коэффициентов корреляций для температуры приводит к их снижению и меньшему количеству значимых взаимосвязей.

Подход с использованием 15-дневных скользящих климатических рядов обеспечивает более точное определение временных границ положительного и отрицательного воздействия температур и осадков на радиальный прирост хвойных (рис. 6). Так, для лиственницы KAZ важны осадки начиная с апреля и почти до конца июня. Отрицательное влияние оказывают высокие температуры с конца апреля по июнь включительно, с наиболее выраженными корреляциями в мае и первой половине июня. Для роста сосны в этом же районе наиболее значимы осадки с середины мая по июнь включительно, а в апреле и первой половине мая их влияние менее выражено. В отрицательном влиянии температур выделяются два небольших интервала – первая декада мая и первая декада июня, когда оно максимально.

На участке ВІD для лиственницы наиболее отрицательное влияние оказывают высокие температуры середины апреля и конца июня, а положительное влияние осадков

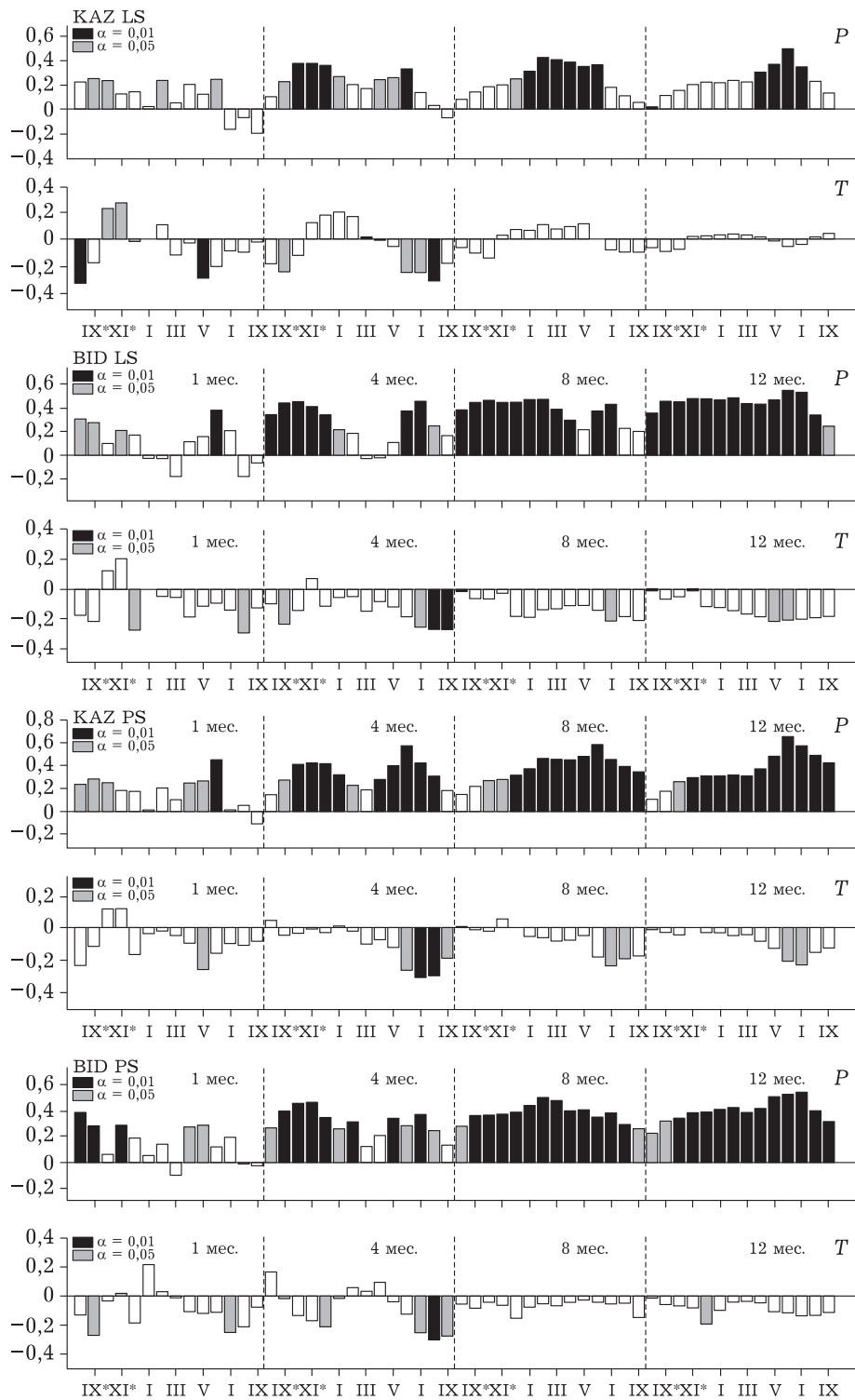


Рис. 5. Климатический отклик остаточных хронологий, рассчитанный в программе Seascorr, для диапазонов длительностью 1, 4, 8 и 12 мес. Основным лимитирующим фактором – осадки, вторичный – температура. На горизонтальной оси показан последний месяц периода



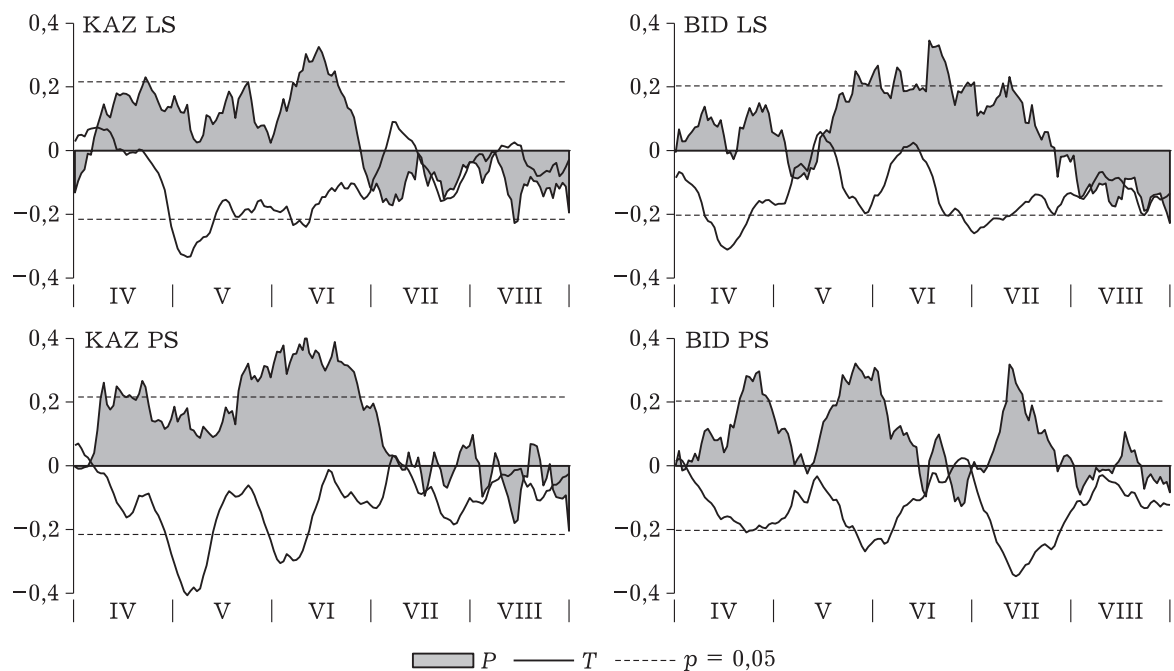


Рис. 6. Парные корреляции хронологий со скользящими 15-дневными рядами температуры и осадков (окно 15 дней, шаг 1 день) текущего вегетационного сезона

проявляется с середины мая до середины июля. У сосны на этом участке выделяются три отдельных интервала (вторая половина апреля, третья декада мая – первая декада июня и середина июля), в течение которых положительное влияние осадков и отрицательное – температур наиболее выражено, в то время как в климатическом отклике лиственницы эти три интервала наблюдаются только для влияния температур. На обоих участках периоды значимого влияния климатических факторов на прирост заканчиваются у лиственницы раньше, чем у сосны примерно на 5–10 дней, в то же время на участке KAZ этот момент наступает более чем на две декады раньше, чем на участке BID.

#### ОБСУЖДЕНИЕ

В лесостепи основным лимитирующим прирост деревьев фактором является влажность почвы [Fritts, 1976]. Однако отсутствие длительных инструментальных данных приводит к необходимости оценивать ее косвенно, через факторы окружающей среды, определяющие динамику данного параметра. Ча-

сто используемым вариантом такой комбинации факторов являются средняя температура воздуха и количество осадков. Совместное использование трех обсуждаемых подходов дендроклиматического анализа позволило рассмотреть, каким образом в лесостепных условиях юга Сибири радиальный прирост хвойных деревьев регулируется колебаниями температуры и осадков в течение различных сезонов [Андреев и др., 2001; Агафонов, Кукарских, 2008; Магда и др., 2011].

Недостаточное увлажнение приводит к наличию положительного отклика прироста на осадки, как основной источник влаги, в течение всего вегетационного сезона. После окончания вегетации по мере снижения температуры осадки накапливаются в почве, а позднее формируют снеговой покров, выполняющий функцию защиты почвы от промерзания и дополнительного аккумулятора влаги, замедляющего высыхание почвы весной [Vaganov et al., 1999]. Наименьшее влияние оказывают осадки второй половины холодного сезона, когда их количество минимально (в Хакасии в январе – марте выпадает в среднем менее 10 мм в месяц), а снеговой покров уже сформирован.

Отрицательное влияние температуры вегетационного сезона определяется тем, что она регулирует потенциальную эвапотранспирацию, т. е. скорость потери влаги почвой и растениями [Fritts, 1976; Rossi et al., 2008; Bjorklund et al., 2017]. В июне – июле, когда температуры достигают максимума, это воздействие может также усугубляться возникновением у растений теплового стресса. В марте – апреле достаточное для выхода деревьев из фазы покоя повышение температуры может смениться заморозками, что приводит к повреждениям тканей и угнетению роста растений [Schulze et al., 2005].

Сравнение результатов, полученных при использовании разных подходов, показало следующее. Классический корреляционный анализ ежемесячных климатических рядов позволяет выявить и оценить значимость отклика прироста на ежемесячные климатические ряды, т. е. может использоваться для предварительной оценки факторов, значимых для роста деревьев. Однако сложная структура климатического отклика приводит к тому, что каждый отдельно взятый фактор определяет небольшую долю изменчивости прироста, что часто обуславливает низкие коэффициенты корреляции. Поэтому следующим шагом проводится обобщение климатических рядов в тех временных интервалах, для которых их влияние однотипно. Это обобщение, интегрируя влияние климата в течение всего сезона или даже года, приводит к выявлению наиболее выраженных взаимосвязей и к сглаживанию видовых различий в климатическом отклике, вызванных несовпадением сроков наступления фенофаз у сосны и лиственницы. С другой стороны, различия между участками сохраняются, так как различаются природно-климатические условия. Например, сдвиг основного годового диапазона влияния осадков и весенне-летнего диапазона влияния температур связан с более поздним окончанием формирования годичного кольца на участке VID, где наблюдаются более высокие летние температуры.

Обоснованием для применения второго подхода – использования частных коэффициентов корреляции – является наличие в регионе значимой отрицательной корреляции между температурами и осадками, а также их разнонаправленное влияние на динамику

влажности почвы. Результаты Seascorr-анализа показали, что воздействие температуры и осадков на прирост хвойных действительно взаимосвязано, так как частные корреляции температуры с приростом ниже парных. Тем не менее наличие значимых частных корреляций температуры с приростом указывает на то, что климатический отклик деревьев в лесостепной зоне нельзя описать только воздействием осадков, в отличие от экстремально засушливых регионов, таких как Юго-Запад США [Meko et al., 2013]. В этом отношении лесостепи юга Сибири можно сравнить с семиаридными средиземноморскими регионами, где рост древесных растений также находится под разнонаправленным влиянием осадков и температур, хотя и в других сезонных интервалах [Touchan et al., 2016]. Основным достоинством этого подхода является выявление наиболее критичного лимитирующего фактора и интервала его максимального влияния, в данном случае это годовое количество осадков с июля по июнь (KAZ) или с августа по июль (VID). В связи с этим Seascorr-анализ наиболее применим в таком направлении, как длительная реконструкция климатических и других экологических факторов [Meko et al., 2013; Touchan et al., 2014, 2016; Shah et al., 2015; Coulthard, Smith, 2016]. Однако этот подход не позволяет провести более детальный анализ климатического отклика во времени.

Более детальные результаты дает использование третьего подхода – использования климатических рядов, рассчитанных для скользящих 15-дневных интервалов с шагом один день [Vaganov et al., 1999; Panyushkina et al., 2003; Бабушкина и др., 2010; Carrer et al., 2017]. Он чаще используется для анализа климатического отклика структуры годичного кольца, например, гистометрических параметров или максимальной плотности. Это связано с тем, что такие параметры формируются за относительно короткий промежуток времени. Тем не менее этот подход применим и для дендроклиматического анализа радиального прироста. Нет сомнения, что сезонный рост деревьев не приурочен к календарю, и ежемесячные климатические данные могут не соответствовать реальному началу или окончанию сезона роста. Кроме того, очевидна видоспецифичность климати-

ческого отклика и его зависимость от локальных условий произрастания и климатических градиентов [Велисевич, Хуторной, 2009; Friedrichs et al., 2009; Кузнецова, Козлов, 2011]. Существенное различие между KAZ и VID может обуславливаться более высокими летними температурами и меньшим количеством осадков на участке VID (см. рис. 1), в то время как основной причиной междувидовых различий в деталях климатического отклика служат физиологические особенности вечнозеленых (сосна) и листопадных (лиственница) хвойных. Поэтому третий подход помогает выделять периоды значимости влияния климатических факторов, не обязательно привязанные к месячным рядам. То есть его использование позволяет более точно уточнить те критические периоды сезона, когда влияние климатических факторов наиболее значимо для сезонного прироста годичных колец.

Таким образом, третий подход, несмотря на его ограничение по наличию суточных климатических данных, может оказаться полезным для таких направлений исследования, как физиология процессов роста и развития растений. Особенно это важно для регионов с высоким разнообразием рельефа, климата и природных зон, где локальные различия приводят к значительной пространственной вариации климатического отклика растений. Отметим также, что этот подход представляется весьма перспективным при анализе изменений в датах и интенсивности сезонного роста древесных растений в случае региональных изменений климата. Это подтверждается рядом работ, в которых такие направленные изменения в сроках начала вегетационного сезона выявлены в росте годичных колец, в данных по фенологии древесных растений или дистанционных данных [Bunn et al., 2013; Yang et al., 2017]. Нет сомнений, что в рамках данной работы рассмотреть более подробно применение подхода с расчетом скользящей средней или суммы климатического фактора с определенным окном и шагом как инструмента выявления тенденций в отклике климат – прирост не представляется возможным, однако эта задача представляется весьма интересной для дальнейших исследований.

## ВЫВОДЫ

Для лесостепных условий юга Сибири, где режим увлажнения играет в росте древесных растений ведущую роль, использование трех рассмотренных подходов к анализу отклика климат – прирост позволяет сформулировать следующие выводы:

1. Традиционный дендроклиматический анализ дает оценки значимости ежемесячных средних температур и сумм осадков для формирования радиального прироста, тем самым выделяя положительное или отрицательное влияние условий отдельных месяцев. Эта оценка показывает различия как для отдельных видов древесных растений, так и для различающихся условий произрастания.

2. При интегрировании климатических переменных за несколько месяцев более четко выделяется общее в отклике климат – прирост деревьев для разных видов в одних условиях.

3. Использование Seascorr ранжирует использованные в анализе климатические факторы по их значимости для изменчивости радиального прироста в конкретных условиях произрастания, усиливает и уточняет важный временной интервал влияния ведущего фактора. Результаты применения Seascorr-анализа потенциально наиболее приемлемы для реконструкции ведущего фактора по изменчивости радиального прироста в прошлом.

4. Подход, использующий короткие скользящие временные интервалы обобщения климатических факторов, позволяет более точно устанавливать критические интервалы в сезоне, когда влияние этих факторов наиболее значимо. Эти интервалы не совпадают с календарными месяцами, поэтому такой подход позволяет также объяснить слабую корреляцию прироста и ежемесячных рядов климатических факторов.

5. Для анализа прогнозируемых изменений климата и их влияния на рост древесных растений третий из анализируемых подходов наиболее перспективен, поскольку оценивает отклик с учетом текущего времени сезона и возможных изменений в сроках его начала или окончания.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 17-04-00315).

## ЛИТЕРАТУРА

- Агафонов Л. И., Кукарских В. В. Изменение климата прошлого столетия и радиальный прирост сосны в степи Южного Урала // Экология. 2008. № 3. С. 173–180 [Agafonov L. I., Kukarskikh V. V. Climate change of the last century and radial growth of pine in Southern Urals steppe // Rus. Journ. Ecol. 2008. Vol. 39, N 3. P. 160–167].
- Андреев С. Г., Ваганов Е. А., Наурзбаев М. М., Тулоханов А. К. Радиальный прирост деревьев как индикатор длительных изменений гидрологического режима в бассейне озера Байкал // Геогр. и прир. рес. 2001. № 4. С. 49–54.
- Бабушкина Е. А., Ваганов Е. А., Силкин П. П. Влияние климатических факторов на клеточную структуру годичных колец хвойных, произрастающих в различных топоэкологических условиях лесостепной зоны Хакасии // Журн. Сиб. фед. ун-та. Биология. 2010. № 3, вып. 2. С. 159–176.
- Баженова О. И., Тюменцева Е. М. Структура современной денудации в степях Минусинской котловины // Геогр. и прир. рес. 2010. № 4. С. 86–94 [Bazhenova O. I., Tyumentseva E. M. Structure of contemporary denudation in the steppes of the Minusinskaya depression // Geogr. and Natural Res. 2010. Vol. 31, N 4. P. 362–369].
- Ваганов Е. А., Бриффа К. А., Наурзбаев М. М., Швейнгрубер Ф. Г., Шиятов С. Г., Шишов В. В. Длительные климатические изменения в арктической области Северного полушария // ДАН. 2000. Т. 375, № 1. С. 103–106 [Vaganov E. A., Naurzbaev M. M., Shishov V. V., Briffa K. R., Schweingruber F. H., Shiyatov S. G. Long-term climatic changes in the arctic region of the northern hemisphere // Dokl. Earth Sci. 2000. Vol. 375, N 8. P. 1314–1317].
- Ваганов Е. А., Пашкин А. В. Рост и структура годичных колец хвойных. Новосибирск: Наука, 2000. 232 с.
- Велисевич С. Н., Хуторной О. В. Влияние климатических факторов на радиальный прирост кедра и лиственницы в экотопах с различной влажностью почвы на юге Западной Сибири // Журн. Сиб. фед. ун-та. Биология. 2009. Т. 2, № 1. С. 117–132.
- Кузнецова Е. П., Козлов Д. Н. Внутриландшафтная изменчивость радиальных приростов лиственницы сибирской (*Larix sibirica* Ledeb.) Терехольской долины Тывы в XX в. // Там же. 2011. Т. 4, № 4. С. 325–337.
- Магда В. Н., Блок Й., Ойдупаа 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.
- Макунина Н. И. Ботанико-географическая характеристика лесостепи Алтае-Саянской горной области // Сиб. экол. журн. 2016. № 3. С. 405–413 [Makunina N. I. Botanical and geographical characteristics of forest steppe of the Altai-Sayan mountain region // Contemporary Problems of Ecology. 2016. Vol. 9, N 3. P. 342–348].
- Шишов В. В., Наурзбаев М. М., Ваганов Е. А., Ивановский А. Б., Корец М. А. Анализ изменчивости радиального прироста древесных растений на территории северной части Евразии в последние десятилетия // Изв. РАН. Сер. географическая. 2007. № 3. С. 49–58.
- Шиятов С. Г. Дендрохронология верхней границы леса на Урале. М.: Наука, 1986. 136 с.
- Belmecheri S., Babst F., Wahl E. R., Stahle D. W., Trouet V. Multi-century evaluation of Sierra Nevada snow-pack // Nature Climate Change. 2016. N 6. P. 2–3.
- Bjorklund J., Seftigen K., Schweingruber F., Fonti P., von Arx G., Bryukhanova M. V., Cuny H. E., Carrer M., Castagneri D., Frank D. C. Cell size and wall dimensions drive distinct variability of earlywood and latewood density in Northern Hemisphere conifers // New Phytologist. 2017. P. 1–13.
- Bunn A. G., Hughes M. K., Kirdyanov A. V., Losleben M., Shishov V. V., Berner L. T., Oltchev A., Vaganov E. A. Comparing forest measurements from tree rings and a space-based index of vegetation activity in Siberia // Environ. Res. Lett. 2013. Vol. 8, N 3. 035034 (8pp).
- Cai Q., Liu Y. Two centuries temperature variations over subtropical southeast China inferred from *Pinus taiwanensis* Hayata tree-ring width // Climate Dynamics. 2017. Vol. 48, N 5–6. P. 1813–1825.
- Carrer M., Castagneri D., Prendin A. L., Petit G., von Arx G. Retrospective analysis of wood anatomical traits reveals a recent extension in tree cambial activity in two high-elevation conifers // Front. Plant Sci. 2017. N 8. P. 737.
- Cavin L., Jump A. S. Highest drought sensitivity and lowest resistance to growth suppression are found in the range core of the tree *Fagus sylvatica* L. not the equatorial range edge // Global Change Biol. 2017. Vol. 23, N 1. P. 362–379.
- Chytrý M., Danihelka J., Kubešová S., Lustyk P., Ermakov N., Hájek M., Řezníčková M. et al. Diversity of forest vegetation across a strong gradient of climatic continentality: Western Sayan Mountains, southern Siberia // Plant Ecol. 2008. Vol. 196, N 1. P. 61–83.
- Cook E. R., Krusic P. J. Program ARSTAN (Version 41d) / Lamont-Doherty Earth Observatory, Columbia University, Palisades, N.Y., 2005. URL: <http://www.ldeo.columbia.edu/tree-ring-laboratory/resources/software>
- Cook E. R., Seager R., Cane M. A., Stahle D. W. North American drought: Reconstructions causes and consequences // Earth Sci. Rev. 2007. N 81. P. 93–134.
- Cortina J., Maestre F. T., Vallejo R., Baeza M. J., Valdecantos A., Pérez-Devesa M. Ecosystem structure, function, and restoration success: Are they related? // J. Nature Conservation. 2006. N 14. P. 152–160.
- Coulthard B., Smith D. J. A 477-year dendrohydrological assessment of drought severity for Tsable River, Vancouver Island, British Columbia, Canada // Hydrological Proc. 2016. Vol. 30, P. 11. P. 1676–1690.
- DeRose R. J., Bekker M. F., Wang S.-Y., Buckley B. M., Kjelgren R. K., Bardsley T., Rittenour T. M., Allen E. B. A millennium-length reconstruction of Bear River stream flow, Utah // J. Hydrol. 2015. Vol. 529, N 2. P. 524–534.
- Friedrichs D. A., Trouet V., Buntgen U., Frank D. C., Esper J., Neuwirth B., Löffler J. Species-specific climate sensitivity of tree growth in Central-West Germany // Trees. 2009. N 23. P. 729–739.
- Fritts H. C. Tree-Ring and Climate. London; New-York; San Francisco: Acad. Press, 1976. 567 p.
- Fulé P. Z. Wildfire ecology and management at Grand Canyon, USA: Tree-ring applications in forest fire

- history and modeling // *Tree Rings and Natural Hazards*. Springer Netherlands, 2010. P. 365–381.
- Goldblum D., Rigg L. S. Tree growth response to climate change at the deciduous-boreal forest ecotone, Ontario, Canada // *Canad. Journ. Forest Res.* 2005. N 35. P. 2709–2718.
- Holmes R. L. Dendrochronology program library – users manual. Tucson: Laboratory of Tree-Ring Research, University of Arizona, 1998.
- Hou Y., Niu Z., Zheng F., Wang N., Wang J., Li Z., Chen H., Zhang X. Drought fluctuations based on dendrochronology since 1786 for the Lenglongling Mountains at the northwestern fringe of the East Asian summer monsoon region // *J. Arid Land*. 2016. Vol. 8, N 4. P. 492–505.
- Kurz-Besson C. B., Lousada J. L., Gaspar M. J., Correia I. E., David T. S., Soares P. M. M., Cardoso R. M., Russo A., Varino F., Mériaux C., Trigo R. M., Gouveia C. M. Effects of recent minimum temperature and water deficit increases on *Pinus pinaster* radial growth and wood density in Southern Portugal // *Front. Plant Sci.* 2016. N 7. P. 1170.
- Laughlin D. C., Grace J. B. A multivariate model of plant species richness in forested systems: Old-growth montane forests with a long history of fire // *Oikos*. 2006. Vol. 114, N 1. P. 60–70.
- Lavergne A., Daux V., Villalba R., Barichivich J. Temporal changes in climatic limitation of tree-growth at upper treeline forests: Contrasted responses along the west-to-east humidity gradient in Northern Patagonia // *Dendrochronologia*. 2015. N 36. P. 49–59.
- Liang W., Heinrich I., Simard S., Helle G., Liñán I. D., Heinken T. Climate signals derived from cell anatomy of Scots pine in NE Germany // *Tree Physiol.* 2013. N 33. P. 833–844.
- Maxwell J. T. The benefit of including rarely-used species in dendroclimatic reconstructions: A case study using *Juglans nigra* in South-Central Indiana, USA // *Tree-Ring Res.* 2016. Vol. 72, N 1. P. 44–52.
- Meko D. M., Touchan R., Anchukaitis K. J. Seascorr: A MATLAB program for identifying the seasonal climate signal in an annual tree-ring time series // *Computer Geosci.* 2011. Vol. 37, N 9. P. 1234–1241.
- Meko D. M., Touchan R., Díaz, J. V., Griffin D., Woodhouse C. A., Castro C. L., Leavitt S. W. et al. Sierra San Pedro Mártir, Baja California, cool-season precipitation reconstructed from earlywood width of *Abies concolor* tree rings // *J. Geophys. Res.: Biogeosci.* 2013. Vol. 118, N 4. P. 1660–1673.
- Methods of Dendrochronology. Application in Environmental Sciences / eds. E. R. Cook, L. A. Kairiukstis. Dordrecht; Boston; London: Kluwer Acad. Publ., 1990. 394 p.
- Moser Li. A., Fonti P., Buntgen U., Esper J., Luterbacher J., Franzen I. L., Frank D. Timing and duration of European larch growing season along altitudinal gradients in the Swiss Alps // *Tree Physiologist*. 2010. Vol. 30, N 2. P. 225–233.
- Opała M., Migala K., Owczarek P. Two centuries-long dendroclimatic reconstruction based on Low Arctic *Betula pubescens* from Tromso Region, Northern Norway // *Pol. Polar Res.* 2016. Vol. 37, N 4. P. 457–476.
- Opała M., Niedźwiedz T., Rahmonov O., Owczarek P., Małarzewski L. et al. Towards improving the Central Asian dendrochronological network-new data from Tajikistan, Pamir-Alay // *Dendrochronologia*. 2017. N 41. P. 10–23.
- Pan Y., Raynal D. J. Predicting growth of plantation conifers in the Adirondack Mountains in response to climate change // *Canad. Journ. Forest Res.* 1995. Vol. 25, N 1. P. 48–56.
- Panyushkina I. P., Hughes M. K., Vaganov E. A., Munro M. A. R. Summer temperature in northeastern Siberia since 1642 reconstructed from tracheids dimensions and cell numbers of *Larix cajanderi* // *Ibid.* 2003. N 33. P. 1–10.
- Panyushkin I. P., Ovtchinnikov D. V., Adamenko M. F. Mixed response of decadal variability in larch tree-ring chronologies from upper tree-lines of Russian Altai // *Tree-Ring Res.* 2005. Vol. 61, N 1. P. 33–42.
- Pearson K. Note on regression and inheritance in the case of two parents // *Proc. Royal Soc. London*. 1895. Vol. 58. C. 240–242.
- Pederson N., Jacoby G. C., D'Arrigo R. D., Cook E. R., Buckley B. M., Dugarjav C., Mijiddorj R. Hydrometeorological reconstructions for northeastern Mongolia derived from tree rings: 1651–1995 // *J. Climate*. 2001. Vol. 14, N 5. P. 872–881.
- Restaino C. M., Peterson D. L., Littell J. Increased water deficit decreases Douglas fir growth throughout western US forests // *PNAS*. 2016. Vol. 113, N 34. P. 9557–9562.
- Rinn F. TSAP Win. Time Series Analysis and Presentation for Dendrochronology and Related Applications. Version 4/64 for Microsoft Windows: User Reference. Heidelberg, Germany, 2011. 110 p.
- Polyakova M. A., Demicz I., Becker T., Becker U., Demina O. N., Ermakov N., Kozub L. et al. Scale-and taxon-dependent patterns of plant diversity in steppes of Khakassia, South Siberia (Russia) // *Biodiversity and Conservation*. 2016. Vol. 25, N 12. P. 2251–2273.
- Rossi S., Deslauriers A., Gričar J., Seo J.-W., Rathgeber C. B. K., Anfodillo T., Morin H., Levanic T., Oven P., Jalkanen R. Critical temperatures for xylogenesis in conifers of cold climates // *Global Ecol. and Biogeogr.* 2008. N 17. P. 696–707.
- Rozas V., Olano J. M. Dendroclimatic responses of four European broadleaved tree species near their southwestern range edges // *Dendrobiology*. 2017. N 77. P. 65–75.
- Schulze E. D., Beck E., Müller-Hohenstein K. *Plant Ecology*. Berlin; Heidelberg: Springer, 2005. 702 p.
- Schweingruber F. H. *Tree-rings and environment. Dendroecology*. Bern; Stuttgart; Vienna: Haupt., 1996. 609 p.
- Seim A., Omurova G., Azisov E., Musuraliev K., Aliev K., Tulyaganov T., Lyutsian N., Botman E., Helle G., Liñán I. D., Jivcov S., Linderholm H. W. Climate change increases drought stress of juniper trees in the mountains of central Asia // *PLOS ONE*. 2016. Vol. 11, N 4. P. 1–14.
- Shah S. K., Touchan R., Babushkina E. A., Shishov V. V., Meko D. M. et al. August-July precipitation from tree rings in forest-steppe zone of Central Siberia (Russia) // *Tree Ring Res.* 2015. Vol. 71, N 1. P. 37–44.
- Slimani S., Derridj A., Gutierrez E. Ecological response of *Cedrus atlantica* to climate variability in the Massif of Guetiane (Algeria) // *Forest Systems*. 2014. Vol. 23, N 3. P. 448–460.

- Tejedor E., Saz M. Á., Cuadrat J. M., Esper J., de Luis M. Temperature variability in the Iberian Range since 1602 inferred from tree-ring records // *Climate of the Past*. 2017. Vol. 13, N 2. P. 93–105.
- Tessier L., Keller T., Guiot J., Edouard J., Guibal F. Predictive models of tree-growth: Preliminary results in the French Alps // *The Impacts of Climate Variability on Forests*. 1998. N 74. P. 109–120.
- Touchan R., Akkemik Ü., Hughes M. K., Erkan N. May – June precipitation reconstruction of southwestern Anatolia, Turkey during the last 900 years from tree rings // *Quaternary Res.* 2007. N 68. P. 196–202.
- Touchan R., Christou A. K., Meko D. M. Six centuries of May – July precipitation in Cyprus from tree rings // *Climate Dynamics*. 2014. Vol. 43, N 12. P. 3281–3292.
- Touchan R., Kherchouche D., Oudjehih B., Touchan H., Slimani S., Meko D. M. Dendroclimatology and wheat production in Algeria // *J. Arid Environ.* 2016. N 124. P. 102–110.
- Vaganov E. A., Hughes, M. K., Kirilyanov A. V., Schweingruber F. H., Silkin P. P. Influence of snowfall and melt timing on tree growth in subarctic Eurasia // *Nature*. 1999. N 400. P. 149 –151.
- Vaganov E. A., Hughes M. K., Shashkin A. V. Growth dynamics of conifer tree rings: Images of past and future environments. Springer Science & Business Media, 2006. Vol. 183. 354 p.
- Vaganov E. A., Anchukaitis K. J., Evans M. N. How well understood are the processes that create dendroclimatic records? A mechanistic model of the climatic control on conifer tree-ring growth dynamics // *Dendroclimatology*. Springer Netherlands, 2011. P. 37–75.
- Wang W., Liu X., Xu G., Zeng X., Wu G., Zhang X., Qin D. Temperature signal instability of tree-ring  $\delta^{13}\text{C}$  chronology in the northeastern Qinghai-Tibetan Plateau // *Global and Planetary Change*. 2016. N 139. P. 165–172.
- Wilson R., Elling W. Temporal instabilities of tree-growth / climate response in the Lower Bavarian Forest Region: Implications for dendroclimatic reconstruction // *Trees*. 2003. Vol. 18, N 1. P. 19–28.
- Yang B. C., Qin J., Wang M., He T., Melvin M., Osborn T. J., Briffa K. R. A 3,500-year tree-ring record of annual precipitation on the northeastern Tibetan Plateau // *PNAS*. 2014. Vol. 111, N 8. P. 2903–2908.
- Yang B., He M., Shishov V., Tychkov I., Vaganov E., Rossi S., Ljungqvist F. C., Bräuning A., Griebinger J. New perspective on spring vegetation phenology and global climate change based on Tibetan Plateau tree-ring data // *Ibid.* 2017. Vol. 114, N 27. P. 6966–6971.

## Climatic Response of Conifer Radial Growth in Forest-Steppes of South Siberia: Comparison of Three Approaches

L. V. BELOKOPYTOVA<sup>1</sup>, E. A. BABUSHKINA<sup>1</sup>, D. F. ZHIRNOVA<sup>1</sup>,  
I. P. PANYUSHKINA<sup>2</sup>, E. A. VAGANOV<sup>3,4</sup>

<sup>1</sup> *Khakass Technical Institute, Siberian Federal University*  
655017, Abakan, Shchetinkina str., 27

<sup>2</sup> *Laboratory of Tree-Ring Research, University of Arizona*  
1215 W. Lowell str., Tucson, AZ 85721, USA

<sup>3</sup> *Siberian Federal University*  
660041, Krasnoyarsk, Svobodny ave., 79

<sup>4</sup> *V. N. Sukachev Institute of Forest, SB RAS*  
660036, Krasnoyarsk, Akademgorodok, 50/28

We compared three approaches to study climatic signals of *Pinus sylvestris* and *Larix sibirica* tree-ring width chronologies from the forest-steppe zone of South Siberia, where both temperature and precipitation limit the conifer tree growth: paired correlation of chronologies with monthly climatic variables; paired and partial correlations with monthly and seasonal series of primary and secondary climatic factors, calculated in the Seascorr program; paired correlation with a 15-day moving average series of climatic variables. The comparison showed that simple paired correlation with monthly series as the simplest approach could be used for a wide range of dendroclimatic studies, both as the main procedure and for preliminary analysis. The Seascorr analysis is the most suitable for assessing climate-growth relationship in the extreme growth conditions and for reconstructions of extremes, e.g. droughts, and of their impact periods. The application of a 15-day moving average series is limited by the availability of daily climatic data, but describes the seasonal window of climatic response with high precision. Altogether, the combination of three approaches allowed to explore the spatial-temporal pattern of the conifers radial growth climatic response in South Siberia.

**Keywords:** radial growth, *Pinus sylvestris*, *Larix sibirica*, climatic response, forest-steppe.