DOI: 10.21513/2410-8758-2017-4-46-65 УДК 551.16+551.577.38

ВОЗМОЖНОСТИ И ОГРАНИЧЕНИЯ РЕКОНСТРУКЦИИ СТОКА РЕК И УСЛОВИЙ ЗАСУШЛИВОСТИ ПОВОЛЖЬЯ МЕТОДАМИ ДЕНДРОХРОНОЛОГИИ

В В. Кузнецова, Д.С. Пожидаева

ФГБУН «Институт географии РАН»,
Россия, 119017, г. Москва, Старомонетный переулок, дом 29; *menzzula@gmail.com*

Резюме. Для Поволжья, как и для России в целом, инструментальные наблюдения гидрометеорологических параметров ограничены периодом до примерно 150 последних лет. Более длинные ряды единичны. Ряды данных о речном стоке зачастую достигают длины 50-60 лет. Дендрохронологический метод позволяет продлить существующие ряды наблюдений в прошлое при условии наличия достоверной значимой связи между приростом древесины и реконструируемым параметром. Для Поволжья нами составлены девять древесно-кольцевых хронологий по сосне обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), а также одна региональная мастер-хронология (MasterTY). На их основе построена модель и сделана попытка реконструкции стока реки Илеть (1827-2013 гг.) и индекса суровости засухи Палмера (1825-2013 гг.). Результаты показывают, что произведение подобных реконструкций для Поволжья возможно, причем лучше воспроизводится долгопериодная.

Ключевые слова. Дендрохронология, дендроклиматология, годичные кольца, речной сток, индекс суровости засухи Палмера.

OPPORTUNITIES AND LIMITATIONS FOR THE RECONSTRUCTION OF RIVER RUNOFF AND DRYNESS CONDITIONS IN THE VOLGA REGION WITH DENDROCHRONOLOGY METHODS

V.V. Kuznetsova, D.S. Pozhidaeva

Institute of Geography RAS,
29, Staromonetniy lane, 119017 Moscow, Russia; *menzzula@gmail.com*

Abstract. Data series of hydrometeorological observations for the Volga Region and Russia as a whole are covered roughly up to 150 past years. The longer series are single. Length of hydrological records for the river runoff is even lesser, up to 50-60 years. The dendrochronological method gives an opportunity to extend existing observational data series into past, if a significant relationship between radial tree growth and a parameter to be reconstructed exists. For the Volga region, we have developed nine pine (*Pinus sylvestris* L.) tree ring chronologies and one regional master-chronology (MasterTY). Then, the model is created on the basis of the chronologies, and the reconstruction of runoff for Ilet river (1827-2013) and Palmer Drought Severity Index (1825-2013) is undertaken. The results demonstrate

the feasibility of such reconstructions for the Volga region. However, more accurate results are obtained in the reconstruction of the long-term dynamics.

Keywords. Dendrochronology, dendroclimatology, tree rings, river runoff, Palmer Drought Severity Index

Введение

Одной из особенностей гидрометеорологических данных как Поволжья, так и России в целом является ограниченность длины рядов инструментальных наблюдений до 120 лет. Благодаря данным дендрохронологии возможно значительно продлить временные ряды различных гидрометеорологических характеристик, что позволит не только получить сведения об их динамике, но и сделать некоторые выводы о климатических условиях прошлых столетий (Битвинскас, 1974; Битвинскас, 1984; Шиятов и др., 2000; Mann, 1998; Bradley, 1999).

Прирост древесины в значительной степени регулируется колебаниями климата, он ограничен рядом лимитирующих факторов, таких как недостаток влаги, термические условия и т.п. (Шиятов и др., 2000; Vaganov et al., 2011). В засушливых районах основным лимитирующим фактором являются осадки, в северных холодных районах – теплообеспеченность. В случае наличия одного преобладающего лимитирующего фактора можно выполнить его реконструкцию, так как прирост древесины определяется именно этим фактором. В случае, когда на прирост влияет комплекс факторов, что зачастую характерно для территорий с умеренным климатом, выделить основной фактор достаточно проблематично. Речной сток также зависит от совокупности метеорологических условий, которые оказывают влияние на увлажнение подстилающей поверхности и состояние почвогрунтов в относительно неизменных физико-географических условиях водосбора (Евстигнеев, 1990).

Как на речной сток, так и на прирост древесины опосредованное влияние оказывают различные природные факторы: рельеф поверхности, почвенные условия, характер и состояние растительности. Дендрохронологический метод позволяет реконструировать объем речного стока в тех районах, где прирост древесины и сток обусловлен схожими климатическими параметрами (Büntgen et al., 2010; Carson, Jeffrey, 2005; Cook et al., 2013; Gou et al., 2007; MacDonald et al., 2007; Woodhouse et al., 2006 и др.)

Связь прироста древесины и климатических характеристик на территории умеренных широт подробно изучена европейскими, американскими, российскими специалистами и описана во многочисленных публикациях. Связи прироста хвойных пород с климатом посвящены труды ученых, среди которых исследование А.А. Молчанова (1976), Т.Т. Битвинскаса (1984), М.М. Чернавской с соавт. (1985), З.Н. Самаровой (1992), Р. Браздила с соавт. (Brazdil et al., 2002), Ловелиуса (2010, 2011), О.Н. Соломиной с соавт. (2016), В.В. Мацковского (2013), С. Ст. Джорджа с соавт. (Scott St. George et al., 2014). Для Северного полушария известны работы по климатическому отклику в древесно-кольцевых хронологиях К. Бриффы (Briffa et al., 2001), Р. Вилсона с соавт. (Wilson et al., 2016), Э. Кука (Cook et al., 2004) и др.

Связь между стоком рек Северного полушария и годичным приростом хвойных пород изучена для аридных, субаридных территорий, а также районов с достаточным увлажнением (Carson, Jeffrey, 2005; Cook et al., 2013; Gou et al., 2007; MacDonald et al., 2007; Woodhouse et al., 2006). Реконструировать речной сток при помощи дендрохронологического метода в аридных и субаридных территориях значительно менее затруднительно, чем в зоне умеренного климата, где на прирост древесины оказывает влияние комплекс физико-географических факторов и выделить один, доминантный, зачастую проблематично.

Индекс суровости засухи Палмера (PDSI) – интегральная характеристика температуры и осадков, отражающая одновременно засушливые условия и условия переувлажнения. Индекс рассчитывается по месячным значениям температуры и осадков, а также локальным константам влагоемкости почвы. Расчет индекса производится с помощью применения совокупности эмпирических зависимостей, отражающих региональные запасы влаги, стандартизированные по отношению к локальной климатической норме (Черенкова, Золотокрылин, 2016). PDSI – один из наиболее распространенных показателей условий засушливости, реконструируемый с помощью метода дендрохронологии в условиях, в том числе, умеренного климата. На большей части Европейской территории России (ЕТР) прирост сосны обыкновенной значимо коррелирует с индексом, что позволяет оценить реакцию прироста годичных колец на, например, экстремальные засухи (Соломина и др., 2016). Кроме засушливых условий индекс отражает условия избыточного увлажнения, что также представляет интерес для возможной его реконструкции.

Сток рек – сложный процесс, на который влияет комплекс физико-географических факторов и хозяйственной деятельности. Формирование стока определяют в основном климатические факторы, климат воздействует на сток не только непосредственно, но и через другие природные компоненты: рельеф, почву, растительность (Евстигнеев, 1990).

Реки исследуемого района находятся преимущественно в схожих природных условиях, корреляции между величинами речного стока значимы ($p<0.05$) и составляют до 0.7.

На рост деревьев также основное влияние оказывают климатические условия. В отличие от связи прироста древесины с основными климатическими параметрами (температура, осадки), которые непосредственно обуславливают годовой прирост, зависимость между речным стоком и шириной годичного кольца в разных регионах не столь очевидна. Годовой сток рек складывается из комплекса климатических (температура, осадки, снегозапас, эвапотранспирация и др.) и физико-географических переменных (орографические условия, состав и способность к инфильтрации почвенных горизонтов, геологическое строение – наличие водоупорного горизонта; растительный покров на территории водосбора и др.). Зачастую деревья, произрастающие на водосборной поверхности, оказываются чувствительными к некоторым факторам, формирующим речной сток. Наиболее устойчивые связи между приростом древесины и речным стоком характерны для регионов с недостаточным увлажнением.

Так, в годы засух, дерево в течение вегетационного периода испытывает недостаток влаги, что сказывается на годовом и сезонном приросте (ранняя и поздняя древесина) и отражается в минимальной ширине годичного кольца как за текущий, так и на следующий год. Очевидно, что в годы летних засух речной сток также минимален в период межени, но на сток, как и на прирост древесины влияет, помимо осадков за летне-весенне-осенний период, количество зимних атмосферных осадков. Если поверхность бассейна реки достаточно увлажнена за счет процессов снеготаяния, а засуха происходит в летние месяцы, то древесина весной начинает формироваться в режиме нормального увлажнения и лишь спустя несколько месяцев, в период летней засухи, прирост начинает сокращаться. Потому, с точки зрения анализа отклика прироста древесины на засухи показательным является также прирост года, последующего засушливому. Ввиду многофакторности связей прироста древесины и речного стока в умеренных широтах в настоящей работе произведен анализ отклика ширины годичных колец и речного стока с ежемесячными, сезонными, годовыми температурами и осадками, а также с индексом суровости засухи PDSI. Интересно, что в Поволжье, как и на всей Русской равнине, прирост древесины показывает высокую значимую связь с PDSI. Кроме того, нами установлено, что речной сток анализируемых рек Поволжья также значимо коррелирует с PDSI – в период с апреля по октябрь текущего года корреляции стока и PDSI для всех без исключения рек значимы на уровне ($p<0.05$). Как и в случае с шириной годичных колец, PDSI имеет невысокие сезонные связи с температурами и осадками. Подобные результаты также описаны в работах (MacDonald et al., 2007; Dai et al., 2004).

Успешные реконструкции речного стока проведены для засушливых районов США: К. Вудахуз (Woodhouse et al., 2006), реконструирован сток реки Колорадо за период с 1440 по 1999 гг. Мак Дональдом (MacDonald et al., 2007), а также другими авторами (Stockton, Fritts, 1973; Pederson et al., 2001; Case, MacDonald, 2003) показана возможность реконструкций речного стока методами дендрохронологии не только в аридных условиях, но и в более высоких широтах, где связь прироста и речного стока обусловлена реакцией древостоя на испарение влаги с поверхности водосборного бассейна исследуемых рек, где произрастают используемые для реконструкции деревья. Даже в арктических широтах, где деревья чувствительны преимущественно к температуре, возможно проведение подобных реконструкций, связь прироста бореальных лесов с речным стоком также обусловлена его реакцией на увлажненность почвы водосборного бассейна (Larsen, MacDonald, 1995; Szeicz, MacDonald, 1996; Barber et al., 2000; Pederson et al., 2001; Drobyshev, Niklasson, 2004). Существует ряд работ, в которых произведена реконструкция уровня воды в озерах, связанных с речными системами. Реконструирован уровень воды озера Атабаска с помощью данных о приросте годичных колец древостоя, произрастающего на водосборном бассейне (Stockton, Fritts, 1973). Связь прироста с уровнем воды в озере также обусловлена чувствительностью деревьев к увлажненности почвы водосборного бассейна.

Причина, по которой, в особенности в аридных областях, годичный прирост зачастую значимо коррелирует с речным стоком заключается в следующем. В условиях недостаточного увлажнения основным фактором, лимитирующим прирост хвойных деревьев, являются осадки, тогда как, например, в полярных областях – температуры. Поэтому дерево реагирует на увлажненность почвы и в случае, когда древостой произрастает на водосборной поверхности речного бассейна, наблюдается связь между колебаниями уровня воды в реке, речным стоком и шириной годичных колец. Подобные связи характерны не только для равнинных, но и для горных территорий, где на увлажненность почвы водосборного бассейна, речной сток и годичный прирост деревьев, помимо количества осадков, температур, эвапотранспирации и др., в большей степени влияют процессы снеготаяния (Gou et al., 2007).

Основная цель настоящей работы состоит в рассмотрении возможностей и ограничений реконструкции условий увлажнения Поволжья методами дендрохронологии на примере двух параметров – стока некоторых рек Поволжья и индекса PDSI. Речной сток и PDSI в качестве показателей условий увлажнения выбраны нами неслучайно – именно эти параметры обладают устойчивой, значимой связью с приростом древесины сосны в регионе. Для выполнения цели нами поставлен ряд задач: оценка климатического сигнала в хронологиях по живым деревьям, обнаружении связи между приростом древесины, стоком малых рек Поволжья и индексом PDSI, отбор хронологий, наиболее чувствительных к изменчивости указанных параметров и попытка их реконструкции.

Оценка возможностей и ограничений реконструкции условий летнего увлажнения Поволжья – крупного сельскохозяйственного региона, представляет особый интерес, так как впоследствии подобные работы позволят оценить частоту и интенсивность засух прошлых столетий, периодов маловодья, а также поспособствуют составлению прогноза повторяемости опасных природных явлений для региона.

Район работ

Район исследования лежит в умеренном климате, в зоне смешанных и широколиственных лесов. Преобладающие породы – сосна, ель, дуб, граб. Осадки в течение года распределены относительно равномерно с «пиком» в период с июня по август. Среднегодовое количество осадков составляет 600-700 мм/год. Самые высокие температуры в течение года приходятся на летние месяцы (июнь, июль), наиболее холодные месяцы – февраль, март.

Отбор дендрохронологического материала производился в особо охраняемых природных территориях (ООПТ), так как старовозрастные деревья Поволжья лучше всего сохранились именно в заповедниках, заказниках, национальных парках, где вырубка лесов не осуществляется вовсе или проводится в соответствии с задачами сохранения древостоев. Материал отобран на территории республик Татарстан и Марий Эл, а также Пензенской и Самарской областей (рис. 1) в Национальном парке Марий Чодра, в Жигулев-

ском заповеднике (Самарская обл.), в заповеднике Приволжская лесостепь (Пензенская обл.), в Волжско-Камском государственном природном биосферном заповеднике на территории Республики Татарстан (табл. 1).

Таблица 1. Характеристики древесно-кольцевых хронологий сосны, построенных по живым деревьям

Код площадки	N	E	Число лет с 2 и более сериями	Год начала	Год конца	Кол-во кернов	Кол-во деревьев	Длина хронологии	Средняя чувствительность	Корреляция серий
Татарстан, Волжско-камский заповедник, Сараловский участок. Сосны под дюной										
T01S	55.3	49.2	204	1714	2014	29	15	266	0.20	0.53
Татарстан, Волжско-камский заповедник, Сараловский участок. Сосны на дюне										
T02S	55.3	49.2	207	1808	2014	33	17	207	0.18	0.65
Самарская обл., Жигулевский заповедник, к СЗ от с. Ширяево, склон балки										
T06S	53.4	49.9	165	1828	2015	42	21	188	0.24	0.60
Самарская обл., Жигулевский заповедник, зап. склон горы Стрельная, приводораздельная часть										
T07S	53.4	49.7	226	1786	2014	42	21	229	0.21	0.67
Татарстан, Бугульминский р-н, рядом с с. Петровское, река Сула										
T08S	54.4	52.7	204	1809	2015	41	21	204	0.23	0.56
Пензенская обл., заповедник "Приволжская лесостепь", уч. "Верховья р. Сура"										
T09S	53.3	46.8	214	1788	2014	33	17	227	0.21	0.56
Пензенская обл., на границе заповедника "Приволжская лесостепь" и заказника "Сурские вершины"										
T10S	53.3	46.8	215	1799	2014	33	18	216	0.24	0.56
Нац. парк Марий Чодра										
Y01S	56.0	48.4	213	1802	2014	46	25	213	0.21	0.56
Нац. парк Марий Чодра										
Y02S	56.0	48.4	189	1826	2014	39	15	189	0.30	0.63

Для анализа использовались метеорологические данные (среднемесячные температуры, осадки, значения индекса суровости засухи Палмера, PDSI) из сеточных архивов CRUTS 3.23 (*https://climexp.knmi.nl*) за период с 1901 по 2014 г. с разрешением 5° по широте и долготе, а также из архива Росгидромета (*www.meteorf.ru*) (метеорологические станции г. Пензы, г. Казани пос. Безенчук).

Данные о речном стоке использованы по пяти различным, наиболее репрезентативным рекам, антропогенное воздействие на которые отсутствует (реки не зарегулированы). Длина рядов о речном стоке составляет максимум 54 года, минимум – 28 лет. Нами выбраны именно те гидрологические посты, которые минимально удалены от дендрохронологических площадок (максимум на 100 км). К сожалению, длина рядов наблюдения за речным стоком невелика, но

достаточна для проведения эксперимента по попытке реконструкции данных методом линейной регрессии (при выполнении линейной аппроксимации ряд делится на две равные части для проведения процедуры калибровки и верификации модели (Bradley, 1999; Esper et al., 2002; Gou et al., 2007)).

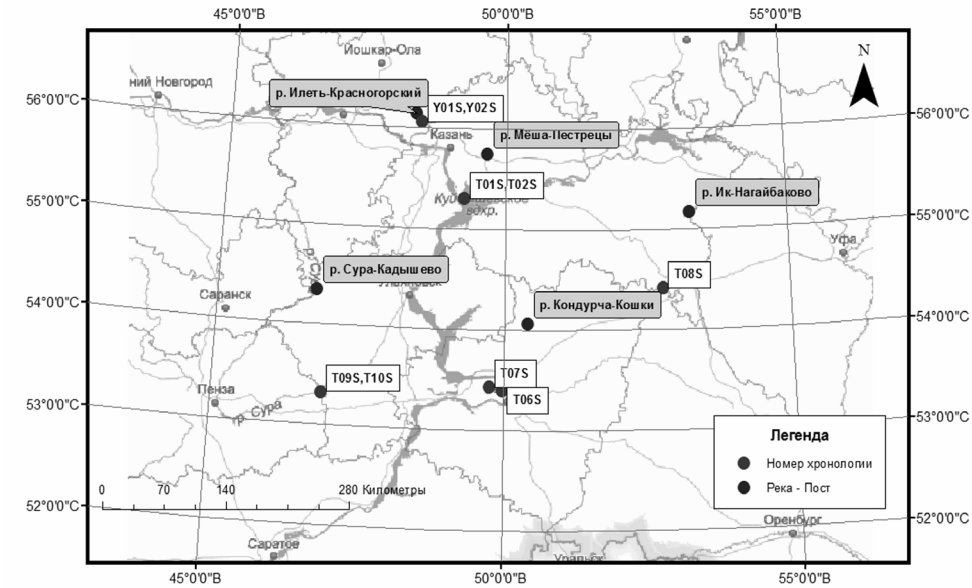

Рисунок 1. Расположение пробных дендрохронологических площадей и гидрологических постов на территории района работ

Таблица 2. Характеристики гидрологических постов, использовавшихся в анализе

№	Река	Створ	Номер сопоставляемой хронологии	Период наблюдений	Количест-во лет
1	Мёша	Пестрецы	T01S, T02S	1960-2013	54
2	Кон-дурча	Кошки	T06S, T07S	1939-1981	42
3	Ик	Нагай-баково	T08S	1986-2013	28
4	Сура	Кадышево	T09S, T10S	1939-1978	39
5	Илеть	Красно-горский	Y01S, Y02S	1965-2013	49

Для рек Поволжья характерно высокое весеннее половодье, низкие летняя и зимняя межени без значительных колебаний речного стока в этот период. Значимые коэффициенты корреляции ($p<0.05$) между речным стоком и количеством осадков характерны только для летнего периода – с июня по июль.

Материалы и методы

В работе использованы дендрохронологические образцы сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), отобранные из живых деревьев. Были

выбраны наиболее старые деревья, произрастающие на водораздельных поверхностях, максимально удаленных от водоемов, с целью извлечения из хронологий максимально значимого климатического сигнала в условиях наличия факторов, лимитирующих прирост (Битвинскас, 1984; Шиятов и др., 2000). Отбор дендрохронологических образцов произведен при помощи приростного бура Пресслера на высоте 1-1.5 м от поверхности земли. Из каждого дерева отбиралось по 2 радиуса, которые затем были наклеены на деревянные подложки, отшлифованы при помощи шлифовальной машины и микротома для увеличения контрастности колец. Для измерений образцы были отсканированы с высоким разрешением (свыше 1200 dpi). Измерения производились при помощи специализированных программ CooRecorder и CDendro. Контроль качества образцов выполнен с помощью программы COFECHA (Grissino-Mayer, 2001; Holmes, 1983). Перед тем, как начать работу с данными о годичном приросте древесины и построить древесно-кольцевую хронологию – объединение образцов, необходимо удалить из нее возрастной тренд (Bradley, 1999; Briffa et al., 2008; Wilson et al., 2016). Возрастной тренд в настоящей работе удален с помощью программы ARSTAN, для чего значение линейного прироста за каждый год поделено на значение точечной аппроксимирующей функции за этот год. Ко всем образцам применено 100-летнее линейное сглаживание – однопараметрическое семейство низкочастотных фильтров, определяемых специальным множителем Лагранжа p. При применении этого фильтра из ряда дендрохронологических данных (ежегодный прирост годичных колец) производится удаление неклиматического сигнала, индивидуальные особенности прироста деревьев сглаживаются путем осреднения ширины годичных колец деревьев в серии древесно-кольцевой хронологии (Cook, Peters, 1981).

Оценка устойчивости корреляций между приростом древесины и реконструируемыми параметрами произведена при помощи специализированного пакета Treeclim (Zang, Biondi, 2014).

Реконструкция значений речного стока выполнена при помощи уравнения простой линейной регрессии типа $Y = a + bx$, где b – угловой коэффициент, измеряющий темп изменения реконструированного параметра (речного стока), x – независимая переменная (в данном случае – ширина годичного кольца), a – свободный член.

В результате было построено 9 стандартных хронологий по ширине годичных колец сосны. Для каждой площадки найдены деревья, возраст которых превышает период инструментальных наблюдений (свыше 120 лет). Максимальная длина хронологии составлена для площадки в Волжско-камском заповеднике (266 лет).

На основании анализа главных компонент (PCA) выделены те площадки, теснота связи между которыми оказалась наибольшей (Frank et al., 2010; Hidalgo et al., 2000) и построена региональная хронология по ширине годичных колец MasterTY (по площадкам T01S, T02S, T10S, Y01S, Y02S).

Результаты

Рассмотрим связь прироста древесины сосны обыкновенной с основными гидрометеорологическими характеристиками.

Статистический анализ связи прироста древесины с метеорологическими характеристиками. Как и ожидалось, обратная связь древесно-кольцевых хронологий с температурами вегетационного периода текущего (май-сентябрь) и предыдущего (май-август) года прослеживается для большинства хронологий и различается лишь по интенсивности (рис. 2), что характерно для многих хронологий Восточно-Европейской равнины (Битвинскас, 1984; Соломина и др., 2016; Babst et al., 2013).

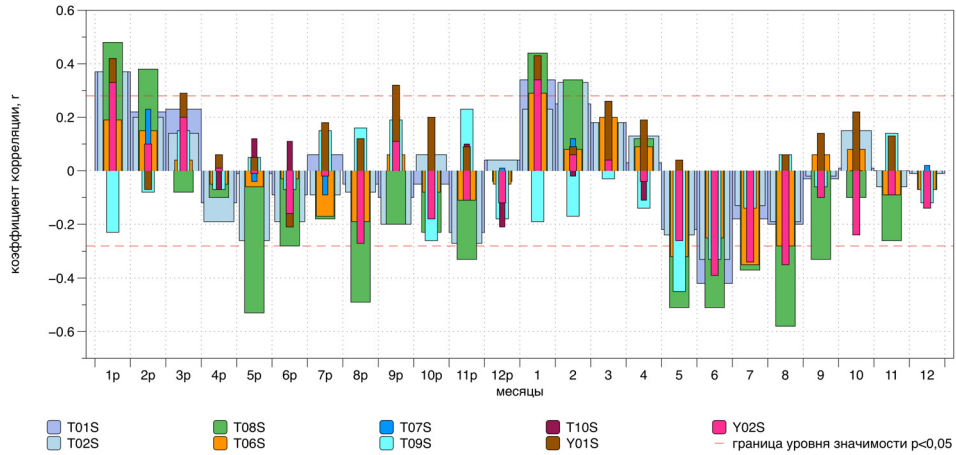

Рисунок 2. Внутригодовая связь хронологий по различным площадкам Поволжья с температурами (1,2… - за текущий год, 1р, 2р… - со сдвигом на 1 год)

Хронологии Волжско-Камского (T01S, T02S) и Жигулевского заповедников (T06S, T07S) значимо ($p<0.05$) коррелируют с ежемесячным количеством осадков за период с мая по август текущего года и с июля по август предыдущего года (рис. 3).

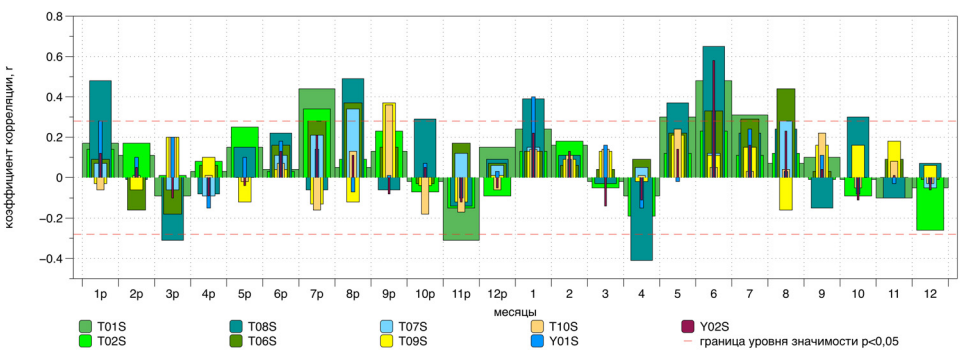

Рисунок 3. Внутригодовая связь хронологий по различным площадкам Поволжья с осадками (1,2… - за текущий год, 1р, 2р… - со сдвигом на 1 год)

Хронологии T09S и T10S показали отсутствие корреляций с гидроклиматическими параметрами.

Реконструкция речного стока. Для оценки возможностей и ограничения реконструкции речного стока малых рек Поволжья методами дендрохронологии нами проведен подробный анализ связи каждой отдельной хронологии ширины годичных колец со стоком исследуемых рек. Большинство хронологий показали связь с изменчивостью стока рек во время межени - с мая по сентябрь (T01S, T06S, T07S, T08S, Y01S), в то время как в период половодья (с апреля по май) связи не обнаружено (рис. 4).

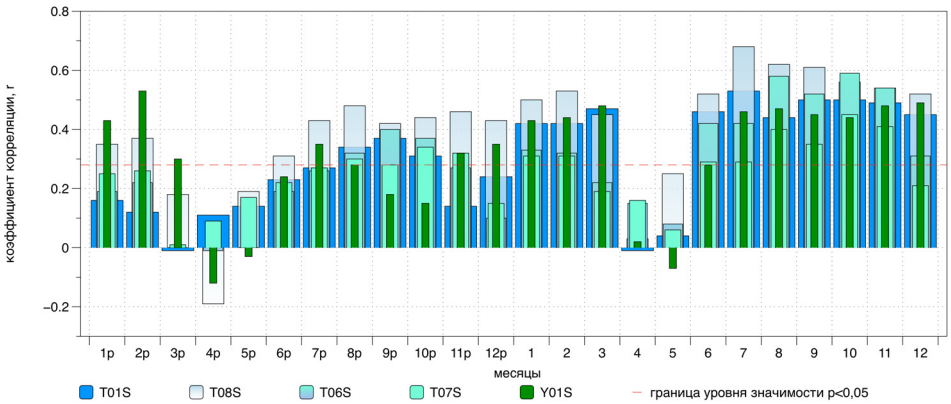

Рисунок 4. Внутригодовая связь хронологий по различным площадкам Поволжья с речным стоком (1,2… - за текущий год, 1p, 2p… - со сдвигом на 1 год)

Несмотря на высокую статистически значимую связь меженного стока всех рек, кроме р. Суры, с приростом древесины, статистически значимые коэффициенты корреляции, удовлетворяющие условиям построения модели линейной регрессии, получены лишь для реки Илеть. Это может быть обусловлено удаленностью гидрологических постов от дендрохронологических площадок, а также индивидуальными особенностями древостоев, различием в физико-географических, в частности, орографических условиях. Региональная мастер-хронология MasterTY не показала значимых корреляций с величинами речного стока, вероятно, по причине удаленности дендрохронологических площадок друг от друга и от гидрологических постов. Наилучшая связь ширины годичных колец и речного стока получена для площадки Y01S, также наиболее успешно прошедшей статистические тесты для составления реконструкции (табл. 3).

Для оценки устойчивости корреляций во времени использован метод плавающего окна с шагом в 31 год (Zang, Biondi, 2014) как для фактических, так и сглаженных рядов стока и ШГК. Как видно из рис. 5, максимально устойчивые и высокие корреляции (≤0.56) наблюдаются для летних месяцев (июль-август), в остальные месяцы, за исключением апреля, мая и июня, корреляции не так велики (≤0.23). Неустойчивые связи прироста с речным стоком в апреле и мае могут быть обусловлены периодом половодья, к которому деревья в умеренных широтах не проявляют чувствительность в

связи с физиологической реакцией на достаточное или избыточное увлажнение подстилающей поверхности в этот время года.

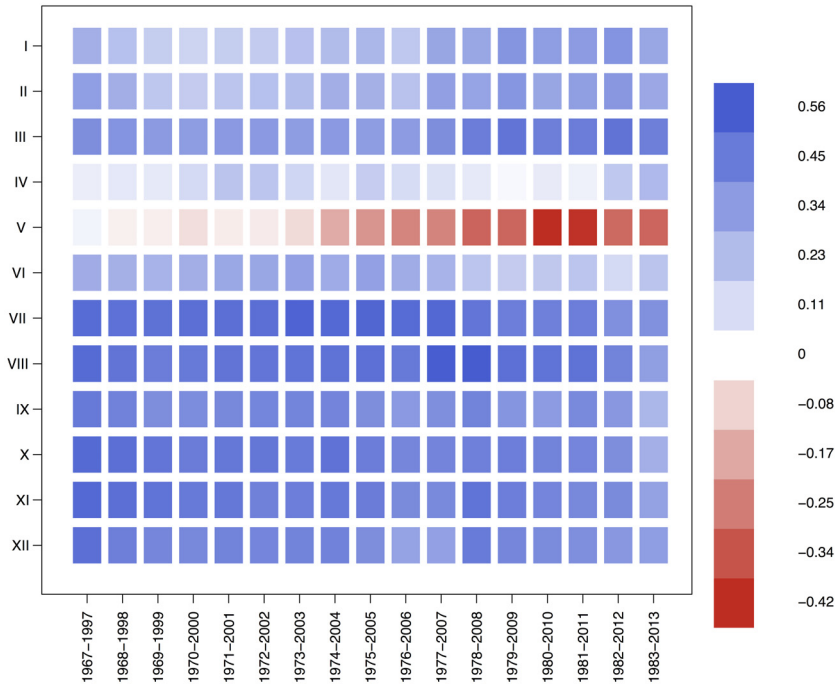

Рисунок 5. Устойчивость корреляций ширины годичного кольца сосны Y01S со стоком р. Илеть за период с 1967 по 2013 г.

На основании данных по площадке Y01S нами построена модель, которая позволила реконструировать сток реки Илеть. Модель отвечает стандартным статистическим критериям (CE, RE положительны, коэффициент Дурбана-Уотсона (DW) близок к 2.0 (табл. 3). Коэффициент корреляции r между речным стоком и приростом древесины для периода с июля по сентябрь составил 0.55 (при уровне значимости $p<0.05$), что может быть обусловлено схожими условиями, влияющими на формирование стока реки и прирост годичных колец – как на сток, так и на ширину колец значительное влияние в период межени оказывает поступающее на территорию водосбора количество атмосферных осадков (коэффициент корреляции для стока реки в период межени и осадков составляет 0.5 ($p<0.05$), для ШГК и осадков корреляция ниже и составляет 0.3 ($p<0.05$)). Модель объясняет 27% изменчивости речного стока ($r^2=0.27$) с июля по сентябрь.

Для сглаженной реконструкции показатели несколько отличаются от реконструкции по фактическим данным (табл. 3), что выражается, в том числе, в менее точном воспроизведении моделью экстремальных значений, что вполне естественно для сглаженного ряда. Но в отличие от случая с фактическими данными, где моделью объясняется лишь 27% изменчивости стока, для сглаженного ряда этот показатель выше и составляет 48%, что вполне ожидаемо так как сглаженные ряды усредняют экстремальные значения данных.

Что касается линейных трендов речного стока, то с 1970 г. наблюдается незначительный рост этого параметра. Анализ линейных трендов реконструированных и фактических рядов показал следующее. Линейный тренд сглаженного фактического ряда практически точно воспроизводится сглаженным реконструированным рядом: углы наклонов которых совпадают с точностью около 0.15%. Максимальный угол наклона линейного тренда характерен для ряда фактических данных и он лучше всего воспроизводится в сглаженных реконструированных рядах (относительная ошибка около 5%). Тренд фактических реконструированных данных ниже примерно на 16%.

Полученные нами реконструированные значения (рис. 6) не всегда адекватно повторяют экстремальные значения речного стока по фактическим данным, что является явным недостатком модели. Однако, обе реконструкции, и в особенности сглаженные, хорошо воспроизводят долгопериодные колебания речного стока (в том числе, масштаба десятилетий).

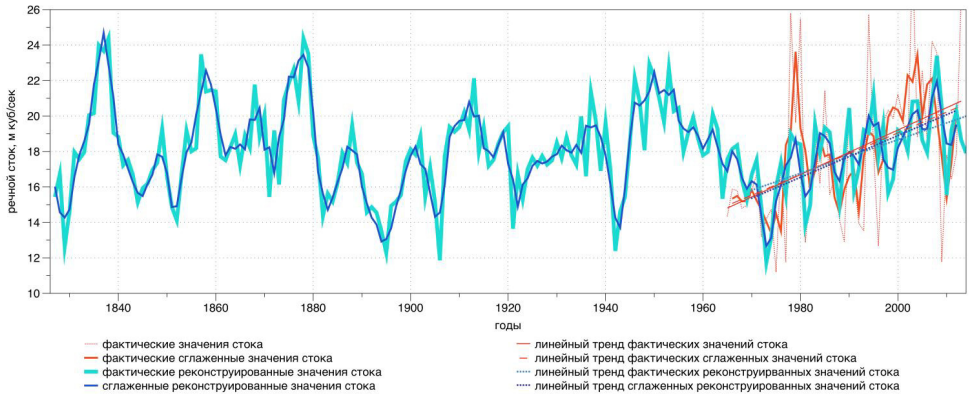

Рисунок 6. Реконструированные значения стока р. Илеть за период с 1827 по 2013 гг. по данным хронологии Y01S (июль-сентябрь)

Несмотря на статистически значимые корреляции, реконструкции не воспроизводят главных минимумов стока и увлажненности, например, в 1975, 1996 и 2010 гг. Модель также занижает амплитуду изменчивости этих параметров, хотя слабый положительный линейный тренд стока реконструкция воспроизводит. Модель лучше воспроизводит сглаженные колебания величины стока. Несмотря на недостатки, обе модели по фактическим и сглаженным рядам данных возможно использовать для последующей реконструкции значений речного стока в период межени в связи с воспроизводимой моделью долгопериодной динамикой и качественной структурой колебаний значений параметра. В перспективе возможно получить сведения о долгопериодной динамике речного стока, а при сравнении полученных результатов с историческими данными, также, возможно, и об изменениях частоты возникновения крупных засух в Поволжье.

Реконструкция PDSI. Как и в случае с речным стоком, для составления реконструкции индекса PDSI нами были проанализированы связи всех 9 поволжских хронологий со значениями индекса и выделены те площадки,

связь с которыми оказалась наилучшей (T01S, T02S, T06S, T08S, Y02S). Статистически значимые корреляции указанных площадок обнаружены для периода с июня по октябрь текущего года (рис. 7), значимой связи с индексом за предыдущий год не обнаружено. Региональная хронология MasterTY (с 1825 по 2013 гг.) продемонстрировала наиболее устойчивые и значимые связи с индексом ($p<0.05$) за период с июля по сентябрь ($r=0.4$-0.7).

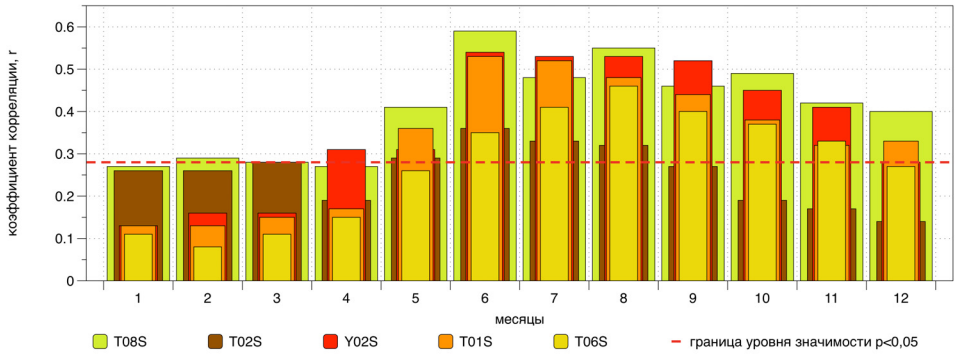

Рисунок 7. Внутригодовая связь хронологий по различным площадкам Поволжья с PDSI за период с января по декабрь текущего года

Как и в случае с речным стоком, произведена оценка устойчивости связи прироста древесины мастер-хронологии MasterTY со значениями индекса PDSI. На рис. 8 хорошо видны устойчивые во времени корреляции, наиболее высокие ($r\leq0.56$) в период с июня по сентябрь, в остальные месяцы корреляции также устойчивы, но на порядок ниже ($r\leq0.31$).

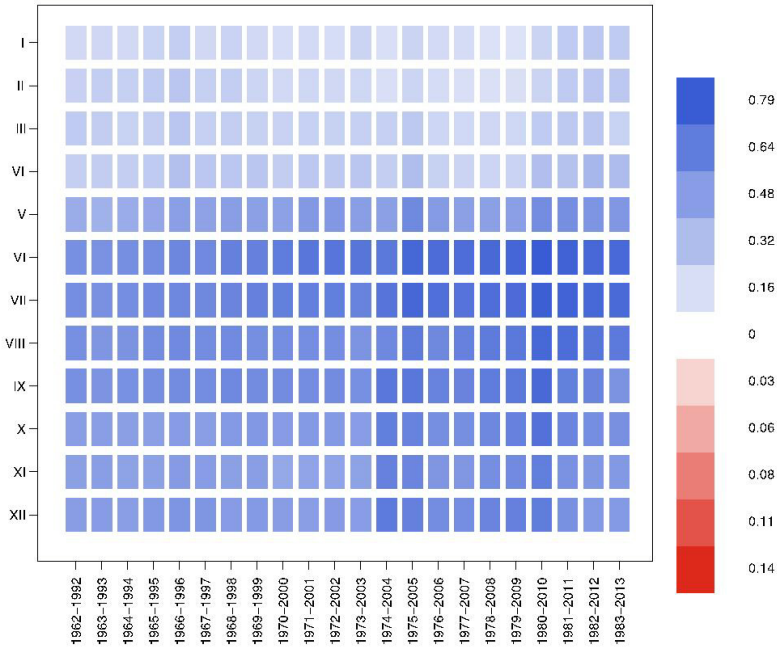

Рисунок 8. Устойчивость корреляций ширины годичного кольца сосны MasterTY с PDSI за период с 1962 по 2013 г.

Как и для речного стока, нами произведена реконструкция фактических и сглаженных рядов значений PDSI. Для сглаженной реконструкции статистические показатели модели также выше, чем при реконструкции фактических значений ряда (табл. 3). Так, коэффициент корреляции r между рядом PDSI и ШГК составляет 0.65 (при уровне значимости $p<0.05$), что выше r для фактических значений (0.6). Моделью объясняется 41% изменчивости ряда сглаженных данных, тогда как для фактических значений этот показатель составляет 0.34%. Тренды в целом выражены слабо; наблюдается небольшое убывание как в фактических, так и реконструированных рядах. Тренды фактических и сглаженных фактических значений практически совпадают и воспроизводятся исходной и сглаженной реконструкцией с относительной ошибкой около 18%). Более значительный отрицательный тренд фактических значений объясняется положительным пиком в первой половине ряда (конец 1970-х) и пиковыми низкими значениями индекса во второй половине ряда: середине 1990-х гг. и около 2010 г., не вполне адекватно воспроизводимых реконструкцией. Следует отметить, что все тренды, по-видимому, незначимы.

Таблица 3. Результаты статистических тестов калибровки и верификации модели реконструкции речного стока (по Y01S) и индекса PDSI (по MasterTY) за период с 1960 по 2013 гг.

	Y01S			**MasterTY**		
	Калибровочный период, 1965-1989	**Верификационный период 1989-2013**	**Полный период, 1965-2013**	**Калибровочный период, 1960-1986**	**Верификационный период, 1986-2013**	**Полный период, 1960-2013**
R	-	-	0.533	-	-	0.598
R2	0.3293	-	-	0.229	-	-
Ajusted R2	0.3572	0.02324	0.271	0.1987	0.462	0.345
Coefficient of efficency	-	-	0.13	-	-	0.157
Reduction of error	-	-	0.486	-	-	0.222
Durbin-Watson Test (DW)	-	-	1.918	-	-	1.383
3-летние сглаженные ряды						
	Y01S 3 year running mean			**MasterTY 3 year running mean**		
	Калибровочный период, 1966-1988	**Верификационн,ый период 1988-2012**	**Полный период, 1966-2012**	**Калибровочный период, 1961-1985**	**Верификационный период, 1985-2012**	**Полный период, 1961-2012**
R	-	-	0.481	-	-	0.651
R2	0.417	-	-	0.3603	-	-
Ajusted R2	0.390	0.1798	0.481	0.337	0.434	0.412
Coefficient of efficency	-	-	0.169	-	-	0.094
Reduction of error	-	-	0.424	-	-	0.270
Durbin-Watson Test (DW)	-	-	2.161	-	-	0.818

Визуально очевидно наличие в фактических рядах выраженных колебаний масштаба полтора – два десятилетия, которые качественно вполне адекватно воспроизводятся реконструированными данными.

Реконструкция, произведенная по мастер-хронологии MasterTY (рис. 9), имеет ряд очевидных несоответствий фактическим значениям индекса PDSI (в 1963, 1967, 1998 гг. и др.). Засуха 1972 г. в реконструкции приходится на 1973 г., что свидетельствует о запаздывании на 1 год, экстремальная засуха 2010 спровоцировала снижение прироста древесины в последующие годы, хотя условия увлажненности уже в 2011 г. пришли в норму.

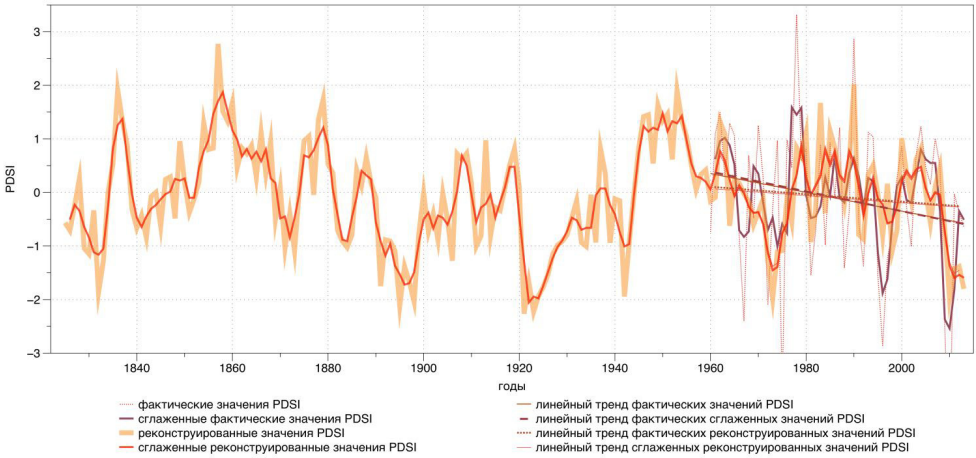

Рисунок 9. Реконструированные значения индекса PDSI за период с 1825 по 2013 гг. по данным хронологии MasterTY (июнь-сентябрь)

Подобные запаздывания зачастую встречаются при проведении дендрохронологических реконструкций и связаны с тем, что если засуха состоялась во второй половине лета, когда кольцо уже практически сформировано (ранняя древесина), то за текущий год как такового сокращения прироста может не наблюдаться. Но минимальный прирост может быть выражен в кольце года, следующего за засушливым, так как дерево потерпело угнетение и не успело восстановиться даже в случае нормальных условий вегетационного периода последующего года. Поэтому в реконструкции, выполненной по дендрохронологическим данным, могут встречаться подобные «запаздывания». Что касается сглаженной реконструкции, то она подходит больше для реконструкции долгопериодной динамики изменчивости рядов данных. Как и в случае с речным стоком, сглаженная и фактическая реконструкции воспроизводят колебания междесятилетнего масштаба.

Дискуссия

В ходе работы было определено, что связь между речным стоком и древесно-кольцевыми хронологиями выше в периоды межени, чем в половодье. Реконструкция значений речного стока в период межени представляет особый интерес для сельского хозяйства, так как является косвенным показателем степени засушливости территории водосбора. Похожий результат описывают

в своей работе Д.М. Макдоналд с соавт. (2007) – их модели гораздо лучше воспроизводят величины минимальных значений речного стока, чем максимальных. Так как прирост древесины в летние месяцы (в период межени) зависит от совокупности тех же параметров, что и речной сток (температуры, осадки, уровень грунтовых вод и проч.), именно за этот период можно с высокой степенью достоверности восстановить значения рядов речного стока. К сожалению, данный метод не позволяет произвести реконструкцию речного стока в период половодья в умеренных широтах так как пики значений речного стока приходятся на весеннее половодье, величина которого напрямую зависит от осадков зимнего периода, тогда как на прирост деревьев осадки зимних месяцев не оказывают существенного влияния (Carson, Jeffrey, 2005). Как и в нашей работе, авторами (Carson, Jeffrey, 2005) получены более высокие и значимые коэффициенты корреляции между значениями речного стока и хронологиями, чем между хронологиями и температурами, осадками.

Таким образом, полученные нами результаты являются перспективными не только в части реконструкции стока рек Поволжья, что представляет очевидный интерес, но и открывают возможность проведения ретроспективного анализа засух для всего региона.

Выводы

На территории Восточно-Европейской равнины, как и в Поволжье, на прирост древесины влияет комплекс гидрометеорологических параметров, и выделить основной фактор, лимитирующий прирост, зачастую проблематично. Поэтому проведение реконструкции температур и осадков на основании данных поволжских древесно-кольцевых хронологий на сегодняшний день затруднительно. Однако, хронологии демонстрируют достаточно высокие значимые связи с речным стоком малых рек Поволжья в период межени как и в работах Макдональда с соавторами (MacDonald et al., 2007), Карсона (Carson, Jeffrey, 2005), а также с индексом суровости засухи Палмера в период с июня по сентябрь, что также показано в работах (Соломина и др., 2016; Büntgen et al., 2011(а,б); Kress et al., 2010).

Связь стока р. Илеть с приростом древесины сосны, возможно, обусловлена близостью дендрохронологической площадки Y01S к гидрологическому посту р. Илеть (15 км). В будущем, при отборе образцов древесины вблизи гидрологических постов при условии наличия старовозрастных деревьев, открывается перспектива реконструкции речного стока незарегулированных рек на основании данных мастер-хронологии, составленной не по одной, а по нескольким площадкам (как показано в нашей работе для PDSI).

Более устойчивая, чем в случае с речным стоком, связь региональной хронологии MasterTY с индексом суровости засухи Палмера PDSI за июнь-сентябрь позволила с более высокой надежностью реконструировать значения индекса за период с 1825 по 2012 г., что открывает перспективы к продлению существующих хронологий и улучшению реконструкции условий засушливости за последние столетия при отборе новых образцов как живой, так и исторической, археологической древесины в Поволжье.

Важно отметить, что в обоих случаях (реконструкция PDSI и речного стока) успешно воспроизводятся изменения масштаба десятилетий, в том числе и количественно, в особенности при использовании сглаженных временных рядов реконструкций.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке проекта РФФИ № 16-35-00408.

Список литературы

Битвинскас Т.Т. 1974. Дендроклиматические исследования. – Л.

Битвинскас Т.Т. 1984. Разработка основ дендроклиматологических исследований в Литовской ССР. – Временные и пространственные изменения климата и годичные кольца деревьев. т. 4, с. 4-49.

Евстигнеев В.М. 1990. Речной сток и гидрологические расчеты. Учебник. – М., Изд-во МГУ, 304 с.

Ловелиус Н.В., Соболев А.Н. Прирост деревьев и климат на Соловецком архипелаге. – География: проблемы науки и образования. LXIII Герценовские чтения. Материалы ежегодной Международной научно-практической конференции 22–24 апреля 2010. – Санкт-Петербург, с. 151-155.

Ловелиус Н.В. 2011. Изменения роста сосны в северо-восточной Европе за 600 лет. – Общество. Среда. Развитие, № 2, с. 229-233.

Мацковский В.В. 2013. Климатический сигнал в ширине годичных колец хвойных деревьев на севере и в центре Европейской территории России. – М., ГЕОС, 148 с.

Молчанов А.А. 1976. Дендроклиматические основы прогнозов погоды. – М., 168 с.

Самарова З.С. 1992. Сравнительный дендроклиматический анализ ели и дуба в Брянском лесном массиве. Автореф. дис. канд. биол. наук. – М., МСХА им. К.А. Тимирязева, 28 с.

Соломина О.Н., Кузнецова В.В., Мацковский В.В., Долгова Е.А. 2016. От чего зависит ширина годичных колец деревьев в центральной части Восточно-Европейской равнины? – Изв. РАН, сер.геогр., № 3, с. 47-64.

Черенкова Е. А., Золотокрылин А. Н. 2016. К вопросу о сравнимости некоторых количественных показателей засухи. – Фундаментальная и прикладная климатология, № 2, с. 27-42.

Чернавская М.М. 1985. Реконструкция термических условий малого ледникового периода на севере Евразии (по дендрохронологическим данным). – Изв. АН СССР. Сер.геогр., № 1. с. 99-103.

Шиятов С.Г., Ваганов Е.А., Кирдянов А.В., Круглов В.Б. и др. 2000. Методы дендрохронологии. Часть I. Основы дендрохронологии. Сбор и полу-

чение древесно-кольцевой информации: Учебно-методич. пособие. – Красноярск, КрасГУ, 80 с.

Babst F., Poulter B., Trouet V., Tan K. et al. 2013. Site- and species-specific responses of forest growth to climate across the European continent. – Glob. Ecol. Biogeogr., 22, pp. 706-717.

Barber, V. A., G. P. Juday, and B. P. Finney. 2000. Reduced growth of Alaska white spruce in the twentieth century from temperature-induced drought stress. – Nature, 405, pp. 668-673.

Bradley R.S. 1999. Paleoclimatology. Reconstructing Climates of the Quaternary. – Third Edition, Elsevier. 696 p.

Brazdil R, Kyncl T, Kyncl J. 2002. Fir tree-ring reconstruction of March-July precipitation in southern Moravia (Czech Republic) – Clim. Res.. vol. 20. pp. 223-239.

Briffa K., Shishov V.V., Melvin, T.M., Vaganov A. et al. 2008. Trends in recent temperature and radial tree growth spanning 2000 years across northwest Eurasia. – Phil. Trans. R. Soc. Lond. B. 363, pp. 2271-2284.

Briffa, K.R., Osborn, T.J., Schweingruber, F.H., Harris et al. 2001. Low frequency temperature variations from a northern tree-ring density network. – J. Geophys. Res. 106, pp. 2929-2941.

Büntgen U., Trouet V., Frank D., Leuschner H.H. et al. 2010. Tree-ring indicators of German summer drought over the last millennium. – Quaternery Sciense Reviews., vol. 29. pp. 1005-1016.

Büntgen U., Brázdil R., Dobrovolny P., Trnka M. et al. 2011a. Five centuries of Southern Moravian drought variations revealed from living and historic tree rings., pp. 167–180. Büntgen U., Brázdil R., Heussner K.U., Hofmann J. et al. 2011b. Combined dendro-documentary evidence of Central European hydroclimatic springtime extremes over the last millennium. – Quaternary Science Reviews, pp. 767-776.

Carson C.E., Jeffrey S.M. 2005. Tree-ring based streamflow reconstruction for Ashley Creek, northeastern Utah: implications for paleohydrology of the southern Uinta Mountains. – The Holocene, pp. 602-6011.

Case, R. A. and MacDonald, G. M. 2003. Tree ring reconstructions of streamflow for three Canadian Prairie rivers. , – J. Am. Water. Re- sour.Assoc., 39, pp. 703-716.

Cook, E., Peters K. 1981, The smoothing spline: A new approach to standardizing forest interior tree-ring width series for dendroclimatic studies. – Tree-Ring Bull., 41, pp. 45-53.

Cook, E.R., Esper, J. D'Arrigo, R. 2004. Extra-tropical northern hemisphere land temperature variability over the past 1000 years. – Quat.Sci. Rev., 23, pp. 2063-2074.

Cook E.R., Palmer J.G., Ahmed M., Woodhouse C.A. et al. 2013. Five Centuries of Upper Indus River Flow from Tree Rings. Journal of Hydrology, 486, pp. 365-375. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2013.02.004

Dai, A., K. E. Trenberth, and T. Qian (2004). 2002. A global data set of Palmer Drought Severity Index for 1870 – 2002: Relationship with soil moisture and effects of surface warming. , – J. Hydrometeorol., 5, pp. 1117-–1130.

Drobyshev, I., and M. Niklasson. 2004. Linking tree rings, summer aridity, and regional fire data: An example from the boreal forests of the Komi Republic, East European Russia. – Can. J. For. Res., 34, pp. 2327-2339.

Esper J., Cook E.R., Schweingruber F.H. 2002. Low-frequency signals in long tree-ring chronologies for reconstructing past temperature variability. – Science, 295, pp. 2250-2253.

Frank D., Esper J., Zorita E., Wilson R. 2010. A noodle, hockey stick, and spaghetti plate: a perspective on high-resolution paleoclimatology. Wiley Interdiscip. – Rev. Clim. Chang.1, pp. 507-516.

Gou X., F. Chen E. Cook G. Jacoby et al. 2007. Streamflow variations of the Yellow River over the past 593 years in western China reconstructed from tree rings. – Water Resour. Res., 43.

Grissino-Mayer, H. D. 2001. Evaluating crossdating accuracy: a manual and tutorial for the computer program COFECHA. – Tree-Ring Research 57, pp. 205-221.

Hidalgo H.G., Piechota T.C., Dracup J.A. 2000. Alternative principal components regression procedures for dendrohydrologic reconstructions,. – Water Resour.Res., 36, pp. 3241-3249.

Holmes R. L. 1983. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measuring. – Tree-Ring Bulletin 43, pp. 69-78.

Kress A.M., Saurer R.T., Siegwolf W., Frank D.C. et al. 2010. A 350 year drought reconstruction from Alpine tree ring stable isotopes. – Global Biogeochem. Cycles, 24, GB2011.

Larsen, C. P. S., and G. M. MacDonald. 1995. Relations between tree ring widths, climate and annual area burned in the boreal forest of Alberta. – Can. J. For. Res., 25, pp. 1746-1755.

MacDonald G. M., K. V. Kremenetski, L. C. Smith, H. G. Hidalgo. 2007. Recent Eurasian river discharge to the Arctic Ocean in the context of longer-term dendrohydrological records. – J. Geophys. Res., 112.

Mann M.E., Bradley R.S., Hughes M.K. 1998. Global scale temperature patterns and climate forcing over the past six centuries. – Nature, 392, pp. 779-788.

Pederson N, Jacoby GC, D'Arrigo RD, Cook ER, Buckley BM, Dugarjav Ch, Mijiddorj R. 2001. Hydrometeorological Reconstruction for Northeastern Mongolia Derived from Tree Rings: AD1651-1995. – Journal of Climate, 14, pp. 872-881.

Stockton, C. W., and H. C. Fritts 1973. Long-term reconstruction of water level changes for Lake Athabasca by analysis of tree rings. – Water Resour. Bull., 9, pp. 1006-1027.

Scott St. George, Toby R. 2014. Ault The imprint of climate within Northern Hemisphere trees. – Quaternary Science Reviews, vol. 89 pp. 1-4.

Szeicz, J. M. and G. M. MacDonald. 1996. A 930-year ring-width chron- ology from moisture sensitive white spruce (Piceaglauca Moench) from northwestern Canada. – Holocene, 6, pp. 345-351.

Vaganov, E.A., Anchukaitis, K.J., Evans, M.N. 2011. How well understood are the processes that create dendroclimatic records? A mechanistic model of the climatic control on conifer tree-ring growth dynamics. Dendroclimatology: Progress and Prospects. – Springer, Dordrecht, pp. 37-75.

Wilson R., Anchukaitis K., Briffa K.R., Büntgen U. 2016. Last millennium northern hemisphere summer temperatures from tree rings: Part I: The long term context. – Quaternary Science Reviews 134, pp. 1-18.

Woodhouse C.A., Gray S.T., Meko D.M. 2006. Updated streamflow reconstructions for the Upper Colorado River Basin. – Water Resour. Res., 42.

Zang, C. and Biondi, F. 2014. Treeclim: an R package for the numerical calibration of proxy-climate relationships. – Ecography, 38, pp. 431-436 (ver. V).

Статья поступила в редакцию: 08.09.2017 г. После переработки: 19.10.2017 г