

УДК 551+630

РЕКОНСТРУКЦИЯ АТМОСФЕРНЫХ ОСАДКОВ ПО РАДИАЛЬНОМУ ПРИРОСТУ СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ НА ЮЖНОМ УРАЛЕ

© 2020 г. Д. Ю. Васильев^{1,2,*}, С. Е. Кучеров^{3,**},
член-корреспондент РАН В. А. Семенов^{2,4}, академик РАН А. А. Чибилёв⁵

Поступило 16.09.2019 г.

После доработки 10.10.2019 г.

Принято к публикации 05.11.2019 г.

В работе представлены результаты анализа связи радиального прироста сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) с количеством атмосферных осадков весенне-летнего периода на Зилаирском плато (Южный Урал). На основе выявленной тесной связи ($r = 0.78$) прироста поздней древесины сосны с количеством осадков мая–июля проведена реконструкция количества осадков с 1776 по 2015 гг. В реконструкции выделяются периоды с количеством осадков меньше среднего на интервалах 1888–1893, 1906–1912, 1952–1959, 2008–2012 и влажные периоды в 1779–1783, 1827–1831, 1834–1838, 1878–1883 гг. Наиболее длительные влажные периоды проявились в первой половине реконструкции – в конце 18-го и в 19-м вв., в то время как наиболее сухие на второй ее половине – в конце 19-го, начале и в 50-х гг. 20-го и начале 21-го вв.

Ключевые слова: сосна обыкновенная, радиальный прирост, атмосферные осадки, корреляционный анализ, вейвлет преобразование, Зилаирское плато, Южный Урал

DOI: 10.31857/S2686739720010119

Атмосферные осадки являются важным компонентом гидрологического цикла, на который влияют глобальные и региональные изменения климата. Изменения осадков имеют более сложную пространственную структуру, чем изменения приземной температуры, и во многих регионах характеризуются разнонаправленными тенденциями, что приводит к большой неопределенности в оценках климатических трендов [1].

В исследовании причин изменения атмосферных осадков и установлении их связи с глобальным потеплением, факторами внешнего воздействия на климат, внутренней естественной изменчивости необходим анализ как можно более

длительных рядов наблюдений. Если в Европе отдельные инструментальные наблюдения охватывают период с начала 19-го в. [2], в редких случаях с начала 18-го в., то в регионах континентальной Евразии инструментальные данные доступны лишь с середины 20-го в., в том числе и по Южному Уралу [3–5]. Для увеличения длительности рядов атмосферных осадков применяются методы реконструкций, основанных на различных косвенных данных, таких как годовые слои древесных растений, кораллов, сталактитов-сталагмитов и ледовых кернов [6]. Исследования по изучению изменчивости количества осадков имеют особо важное значение на региональном уровне в районах с недостаточным увлажнением, к которым относится лесостепная часть Южного Урала и Предуралья. В данной работе представлены результаты реконструкции количества осадков мая–июля на основе анализа радиального прироста сосны обыкновенной.

Исследования проводили на Южном Урале в центральной части Зилаирского плато, высота которого в районе исследования изменялась от 460 до 540 м над уровнем моря. Образцы древесины сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) были взяты на трех участках: ZL1, ZL2 и SR. Участки ZL1 и ZL2 расположены на расстоянии 1 км друг от друга, в среднем течении реки Зилаир на окраине с. Зилаир, а участок SR – в верхнем течении

¹ Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа, Россия

² Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской Академии наук, Москва, Россия

³ Уфимский институт биологии Уфимского исследовательского центра Российской Академии наук, Уфа, Россия

⁴ Институт географии Российской Академии наук, Москва, Россия

⁵ Институт степи Уральского отделения Российской Академии наук, Оренбург, Россия

*E-mail: vasilevdy@ugatu.ru

**E-mail: skucherov@mail.ru

Таблица 1. Статистические характеристики хронологий радиального прироста

Показатели	ZL1 52°13.2' с.ш. 57°26.3' в.д.		ZL2 СШ = 52°13.7' с.ш. ВД = 57°25.4' в.д.		SR 52°20' с.ш. 57°12'–14' в.д.		ZL1 + ZL2 + SR	
	ШГК	ШПД	ШГК	ШПД	ШГК	ШПД	ШГК	ШПД
Длина хронологий	1763–2013		1764–2015		1788–2015		1763–2015	
N	33		15		53		101	
M_S	0.24	0.51	0.22	0.50	0.24	0.51	0.23	0.49
r_{cp}	0.48	0.55	0.41	0.52	0.49	0.54	0.43	0.49
AC1	0.32	–0.03	0.25	0.05	0.31	0.05	0.29	–0.02

Примечание. N – количество деревьев в хронологиях; M_S – коэффициент чувствительности на полных интервалах хронологий; r_{cp} – среднее значение коэффициента корреляции между стандартизированными рядами прироста деревьев на максимально возможных общих интервалах времени; AC1 – коэффициент автокорреляции первого порядка.

реки Большая Сурень на расстоянии 19–20 км от участков ZL1 и ZL2. Инструментальные данные месячных сумм атмосферных осадков и среднемесячных температур воздуха за 1933–2012 гг. были взяты по наблюдениям на метеостанции Зилаир (<http://meteorf.ru>), расположенной в 20 км к юго-востоку от участка SR, и в 1.5–2 км от участков ZL1 и ZL2. У образцов измеряли ширину годичных колец (ШГК) и ширину поздней древесины (ШПД). Датировка годичных слоев в образцах осуществлялась визуально перед проведением измерений по реперным годичным слоям. Стандартизация полученных после измерений рядов прироста проводилась в программе ARSTAN (<http://ldeo.columbia.edu/tree-ring-laboratory>). Возрастные кривые вычислялись с использованием кубических сплайнов [7], экспоненты, прямой линии или по алгоритму «Friedman super smoother» [8]. Начальные годы в хронологиях, соответствующие начальным годам в реконструкции осадков, определяли на основе статистики EPS (Expressed population signal) [9], результаты которой показывают в какой степени реальная хронология отражает гипотетическую, представленную бесконечным количеством деревьев. При значениях $EPS \geq 0.85$ хронология считается достаточно представительной [10], поэтому начальные участки хронологий, на которых $EPS < 0.85$ исключались при проведении реконструкции климатических параметров. Вычисление корреляции между рядами прироста древесины и количеством осадков проводилось для месяцев начиная с мая месяца года, предшествующего приросту, и заканчивалось сентябрем текущего года на двух половинах и на всем интервале метеоданных. Реконструкция климатических переменных проводилась с использованием линейного регрессионного анализа, в котором независимой переменной являлся параметр радиального прироста, а зависимой – климатическая переменная,

с которой выявлена максимальная корреляционная связь параметра радиального прироста. Статистическая достоверность регрессионных моделей была исследована с помощью тестов калибровки-верификации в два этапа. На первом этапе калибровка производилась на первой половине интервала метеоданных (1934–1972 гг.), а верификация полученного калибровочного уравнения проводилась на второй половине метеоданных (1973–2012 гг.). На втором этапе калибровка проводилась на второй половине интервала метеоданных, а верификация на первой. Для выявления периодичностей в реконструированном ряде атмосферных осадков и основных климатических индексов был использован метод вейвлет анализа, реализованный в [11].

Статистические характеристики построенных хронологий радиального прироста приведены в табл. 1. Для всех трех участков хронологии как по ШГК, так и по ШПД имеют большое сходство. Так, коэффициент корреляции между хронологиями по ШПД для трех участков на общем интервале 1788–2013 гг. имеет значения от 0.70 до 0.84. Для того чтобы начальный участок хронологии, по которой будет проводиться реконструкция, был представлен большим количеством деревьев, были построены обобщенные хронологии по ШГК и ШПД, объединяющие деревья всех трех участков (ZL1 + ZL2 + SR, табл. 1, рис. 1). Протяженность этих объединенных хронологий составила 253 года (1763–2015 гг.). У полученных хронологий значению $EPS \geq 0.85$ соответствует участок, представленный пятью и более деревьями. По этой причине начальные участки хронологий (1763–1775 гг.), которые представлены только 1–4 деревьями, были исключены при дальнейшем анализе.

Достоверная на уровне значимости ($p = 0.05$) положительная корреляционная связь у полученных ZL1 + ZL2 + SR хронологий как по ШГК, так

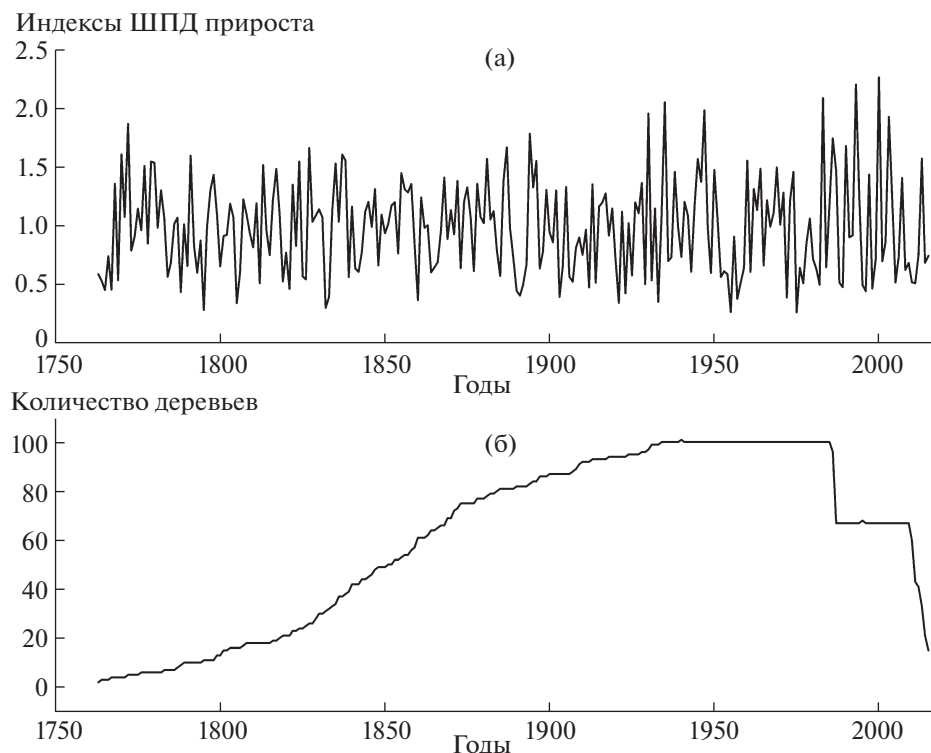


Рис. 1. ZL1 + ZL2 + SR хронология индексов ШПД сосны обыкновенной (а) и количество по годам, входящих в нее деревьев (б).

и по ШПД выявлена с осадками мая, июня и июля текущего года на обеих половинах интервала метеонаблюдений (рис. 2). Максимальная корреляционная связь выявлена у ZL1 + ZL2 + SR хронологии по ШПД (выше, чем у хронологии по ШГК) с суммой осадков мая–июля ($r = 0.78$). Поэтому регрессионная модель, в которой зависимой переменной было количество осадков мая–июля, а независимой переменной ZL1 + ZL2 + SR хронология прироста, была получена по хронологии ШПД (рис. 2). Калибровка и верификация показала, что модель удовлетворяет стандартным тестам (табл. 2) [12, 13]. Сходство между реальными и вычисленными по этому уравнению осадками как в погодичной динамике (коэффициент синхронности 87%), так и по тенденциям достаточно высокое (рис. 3а). Стандартное отклонение реальных осадков в 1.5 раза больше расчетных. После сглаживания рядов реальных и вычисленных осадков 10-летним сплайном различие между рядами несколько уменьшается – значение коэффициента корреляции повышается с 0.78 до 0.81, а отношение стандартных отклонений снижается с 1.5 до 1.35 (рис. 3б). Эти данные свидетельствуют о том, что модель лучше описывает изменчивость на десятилетнем временном масштабе.

На основе полученной регрессионной модели, связывающей количество осадков мая–июля с ZL1 + ZL2 + SR хронологией по приросту позд-

ней древесины, была проведена реконструкция количества осадков мая–июля с 1776 г. В реконструкции наибольший интерес представляют го-

Таблица 2. Результаты калибровки и верификации модели

Интервал калибровки	1933–1972 гг.	1973–2012 гг.
Интервал верификации	1973–2012 гг.	1933–1972 гг.
Калибровка		
R_{adj}^2	0.60 ($p < 0.001$)	0.61 ($p < 0.001$)
Верификация		
r	0.79 ($p < 0.001$)	0.78 ($p < 0.001$)
RE	0.58	0.58
Тест знаков на интервалах верификации	+32 ($p < 0.01$)	+33 ($p < 0.01$)
	–8	–7

Примечание: r – коэффициент корреляции между реальным и вычисленным количеством осадков мая–июля на интервалах верификации, R_{adj}^2 – скорректированное значение коэффициента детерминации с учетом потери степеней свободы между реальным и вычисленным количеством осадков мая–июля на интервалах калибровки [12], RE – статистика, положительные значения которой указывают на надежность реконструкции [13], (+) – количество совпадений, (–) – несовпадений в рядах реального и вычисленного количества осадков.

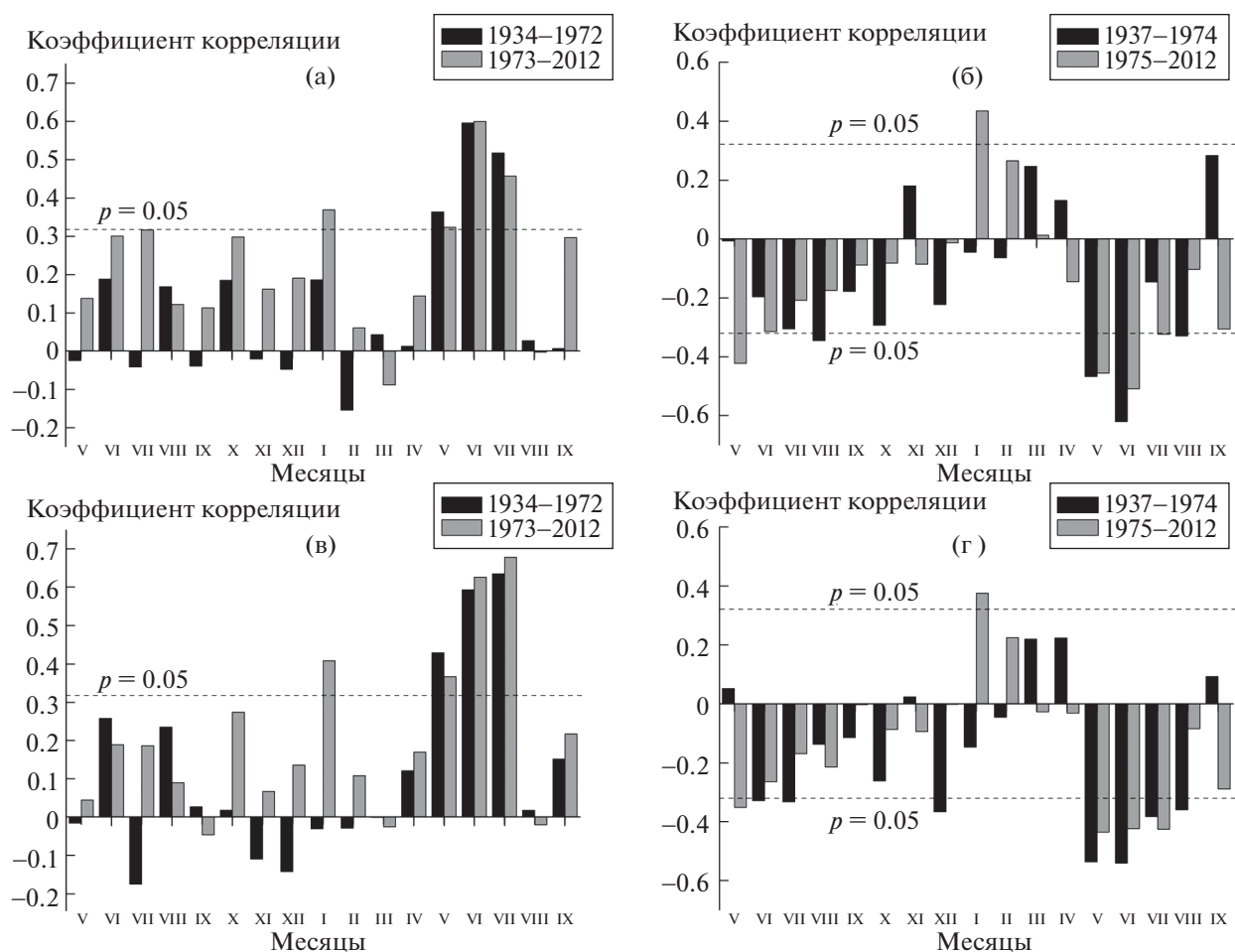


Рис. 2. Коэффициенты корреляции ZL1 + ZL2 + SR хронологий с количеством осадков: а – для ШГК, в – для ШПД и температурой: б – для ШГК, г – для ШПД хронологий. Нумерация месяцев произведена слева направо начиная с мая предшествующего анализа прироста года.

ды, в которые количество осадков мая–июля значительно отклонялось от среднего значения. Такие отклонения были разделены на две категории: умеренно засушливые или влажные, когда отклонение от среднего в единицах стандартного отклонения (Z -значения) превышало, соответственно, в отрицательную и положительную стороны одно стандартное отклонение и экстремально засушливые или влажные при превышении отклонения осадков от среднего на два стандартных отклонения (рис. 36). Всего в проведенной нами 240-летней реконструкции за период с 1776 по 2015 гг. присутствует 46 календарных лет, в которые май–июль был засушливым, и 37 лет – в которые май–июль был влажным. Отметим, что в реконструкции нет экстремально засушливых лет по осадкам мая–июля. В то же время в реконструкции имеются годы, в которых май–июль был экстремально влажным: 1935, 1947, 1983, 1986, 1993, 2000 и 2003 гг. Как видно, все годы в реконструкции с экстремально влаж-

ным маем–июлем приходятся на 20-й и начало 21-го вв.

Методом вейвлет анализа были выявлены циклы, которые можно условно разделить на две группы: высокочастотные колебания с периодами от 2.7 до 7.1 лет и низкочастотные – 11 лет и более. Циклы с периодами 2.7–7.1 лет характерны только для данных реконструкции по осадкам и климатическим индексам и не обнаруживаются при анализе данных по солнечной активности. Периоды длительностью 11 лет и более присутствуют во всех анализируемых рядах данных, при этом вклад низкочастотных колебаний является доминирующим, что свидетельствует о существенном влиянии климатических факторов в изменчивости осадков на этих временных масштабах.

Отметим, что до настоящего времени для региона Южного Урала и прилегающей территории Предуралья было выполнено лишь две реконструкции количества весенне-летних летних осадков [14, 15]. Сходство между данной реконструкцией и реконструкцией количества осадков

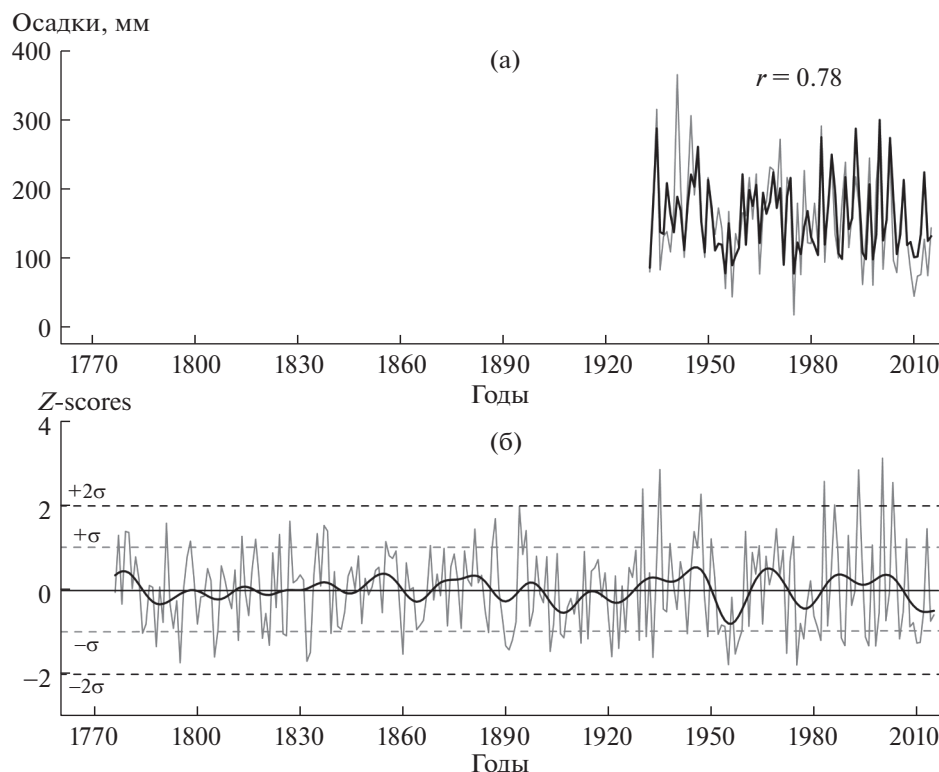


Рис. 3. Инструментальные значения атмосферных осадков – серая линия и реконструированное количество атмосферных осадков мая–июля – черная линия (а), отклонение реконструированного количества осадков от среднего арифметического в единицах стандартного отклонения – серая линия и кривая их сглаживания десятилетним сплайном – черная линия (б).

мая–июля по листовнице Сукачева [14], произрастающей также на Зилаирском плато, достаточно высокое (на общем интервале 1776–2005 $r = 0.77$; сглаженными десятилетним сплайном $r = 0.84$). В обеих реконструкциях, сглаженных десятилетним сплайном, совпадает большинство интервалов, на которых количество осадков было меньше или больше среднего. В них также совпадают и наиболее глубокие минимумы количества осадков, относящиеся к первому и началу второго десятилетий 20-го в., а также к 1950-м и 1970-м гг.

В заключение отметим, что на основе хронологии прироста поздней древесины сосны обыкновенной, имеющей тесную корреляционную связь с количеством осадков мая–июля ($r = 0.78$), проведена реконструкция количества осадков мая–июля за период 1776–2015 гг. В реконструкции хорошо отражены засушливые периоды, известные по данным метеорологических наблюдений и засухи, сведения о которых имеются в архивных материалах и публикациях. Наиболее глубокие минимумы в сглаженной десятилетним сплайном динамике количества летних осадков были на стыке (рубеже) 80-х и 90-х гг. 19-го в., в 50-е годы 20-го в. и в конце первого–начале второго десятилетий 21-го в. Вейвлет-анализ позво-

лил выявить в рядах осадков несколько характеристичных циклов, различных по продолжительности и частоте проявления.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают искреннюю признательность Башкирскому УГМС Росгидромета и лично В.З. Горюховской за предоставленные многолетние данные инструментальных наблюдений по атмосферным осадкам метеостанции с. Зилаир.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ (№ 075–00326–19–00, тема ААААА–А18–118022190060–6) и темы “Эволюция и пространственная дифференциация ландшафтов Южного Приуралья в условиях климатических и антропогенных изменений” Комплексной программы Уральского Отделения РАН (№ АААА–А18–118011690034–6) с использованием результатов, полученных в рамках Программы РАН “Изменения климата: причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. МГЭИК, 2013: Изменение климата, 2013 г.: Физическая научная основа. Вклад рабочей группы I в Пятый оценочный доклад Межправительственной группы экспертов по изменению климата / Под ред. Стокера Т.Ф., Куина Д. МГЭИК, Кембридж, Нью-Йорк, США. 1535 с.
2. Glaser R., Brazdil R., Pfister C., Dobrovolny P., Vallve M.B., Camuffo D., Kotyza O., Limanowka D., Racz L., Rodrigo F. // *Climatic Change*. 1999. V. 43. P. 169–200.
3. Васильев Д.Ю., Гавра Н.К., Кочеткова Е.С., Ферантонтов Ю.И. // *Метеорология и гидрология*. 2013. № 5. С. 79–90.
4. Васильев Д.Ю., Лукманов Р.Л., Ферантонтов Ю.И., Чувывров А.Н. // *ДАН*. 2012. Т. 447. № 3. С. 331–334.
5. Васильев Д.Ю., Павлейчик В.М., Семенов В.А., Сивохин Ж.Т., Чибилев А.А. // *ДАН*. 2018. Т. 478. № 5. С. 588–592.
<https://doi.org/10.7868/S0869565218050201>
6. Brienen R.J.W., Helle G., Pons T.L., Guyot J-L., Gloor M. // *PNAS*. 2012. V. 109. № 42. P. 16957–16962.
<https://doi.org/10.1073/pnas.1205977109>
7. Cook E.R., Peters K. // *Tree-Ring Bull.* 1981. V. 41. 45–53.
8. Friedman J.H. A Variable Span Smoother. Stanford, 1984. Technical Rep. 5.
9. Wigley T.M.L., Briffa K.R., Jones P.D. // *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. 1984. V. 23. 201–213.
10. Briffa K.R., Jones P.D. // *Methods of Dendrochronology: Applications in the Environmental Sciences*. Dordrecht, 1990. 137–152.
11. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2018661344. Рос. Федерация. Реализация метода вейвлет-преобразования гидрометеорологических величин / Д.Ю. Васильев, В.В. Водопьянов; правообладатель Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. – № 2018618840; заявл. 17.08.2018.; зарегистр. 06.09.2018.
12. Draper N.R., Smith H. *Applied Regression Analysis*. 3rd ed. N.Y: John Wiley & Sons, Inc., 1998. 736 p.
13. Fritts H.C., Guiot J., Gordon G.A. // *Methods of Dendrochronology: Applications in the Environmental Sciences*. Dordrecht, 1990. 178–185.
14. Кучеров С.Е. // *Экология*. 2010. № 4. С. 248–256.
15. Кучеров С.Е., Васильев Д.Ю., Мулдашев А.А. // *Экология*. 2016. № 2. С. 83–93.

PRECIPITATION RECONSTRUCTION FOR THE SOUTHERN URAL FROM TREE RINGS OF SCOTS PINE

D. Yu. Vasil'ev^{a,b,#}, S. E. Kucherov^{c,##},

Corresponding-Member of the RAS V. A. Semenov^{b,d}, and Academician of the RAS A. A. Chibilev^e

^a Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russian Federation

^b A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

^c Ufa Institute of Biology, Ufa Federal Research Centre, Russian Academy of Sciences, Ufa, Russian Federation

^d Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

^e Steppe Institute, Ural Branch, Russian Academy of Sciences, Orenburg, Russian Federation

[#] E-mail: vasilevdy@ugatu.su

^{##} E-mail: skucherov@mail.ru

The article analyzes the relationship between radial growth of pine (*Pinus sylvestris* L.) with spring-summer precipitation on the Zilair plateau (Southern Urals). Based on the identified close relationship ($r = 0.78$) of the late wood width of pine with May–July precipitation reconstruction from 1776 to 2015 was made. The reconstruction revealed periods of rainfall less than average at the intervals of 1888–1893, 1906–1912, 1952–1959, 2008–2012, and wet periods in the 1779–1783, 1827–1831, 1834–1838, 1878–1883 years. The longest wet periods were in the first half of the reconstruction – in the late 18th and 19th centuries, while the driest in the second half of the late nineteenth, early 1950-s of 20th, and the beginning of the 21st centuries.

Keywords: scots pine, tree-ring width, atmospheric precipitation, correlation analysis, wavelet transform, Zilair plateau, Southern Urals