

Продление гидрологических рядов дендрохронологическими реконструкциями на примере тополя черного и ивы белой в Западной Сибири

М.А. Гурская¹, Л.И. Агафонов¹, М.О. Ермоленко²

¹ Институт экологии растений и животных УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

² Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург, Россия

e-mail: mgurskaya@yandex.ru

Аннотация. Продление гидроклиматических рядов в прошлое является актуальной задачей современной гидрологии и климатологии. Косвенным источником информации о гидрологических параметрах могут служить годовые кольца деревьев, произрастающих в поймах рек. В северных и аридных экосистемах реконструкции расходов воды по ширине годового кольца успешны, тогда как в условиях с умеренным климатом подобных исследований не проводилось. Кроме того, в существующих работах до сих пор нет однозначного ответа, какой параметр лучше использовать для реконструкции – уровни или расходы воды. Цель этой работы – изучить связи между средними месячными уровнями и расходами воды реки Тура (гидропост Туринск) и шириной годовых колец тополя черного и ивы белой, выполнить реконструкции и выявить годы с экстремальными значениями. Ширина годовых колец измерена на буровых образцах (кернах), полученные серии лет были перекрестно датированы, и индексированные обобщенные хронологии построены за период 1876–2022 гг. по тополю и 1879–2022 гг. по иве. Корреляционный анализ выявил в хронологии по тополю более тесные связи с уровнями воды в мае, чем с расходами, а в хронологии по иве – с уровнями апреля-мая. Регрессионный анализ позволил выполнить реконструкции высоких и низких уровней и расходов воды для реки Тура. Модель реконструкции уровней воды существенно не отличалась от модели расходов. Тем не менее, годы экстремальных значений стока лучше реконструируются с помощью модели уровня воды, чем с помощью модели расходов, что обусловлено с широкой поймой реки и нелинейными связями уровни–расходы при экстремальных уровнях воды. Выявлены периоды с высоким и низким уровнем воды. Прибрежные деревья тополя черного и ивы белой, произрастающие вдоль русел рек, являются хорошими индикаторами гидрологических изменений в южной тайге в Западной Сибири.

Ключевые слова: уровни и расходы воды; тополь черный; ива белая; ширина годовых колец; древесно-кольцевые хронологии; дендрохронологические реконструкции; экстремальные годы; южная тайга; Западная Сибирь.

Для цитирования: Гурская М.А., Агафонов Л.И., Ермоленко М.О. Продление гидрологических рядов дендрохронологическими реконструкциями на примере тополя черного и ивы белой в Западной Сибири // Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2025. Т. 7. Вып. 3. С. 274–285. DOI: 10.34753/HS.2025.7.3.274.

Prolongation of Hydrological Rows of Water Levels and Discharge Using Dendrochronological Reconstructions on Example of Black Poplar and White Willow in Western Siberia

Marina A. Gurskaya¹, Leonid I. Agafonov¹, Maxim O. Yermolenko²

¹ Institute of Plant and Animal Ecology, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg,

Russia; ² Ural Federal University, Yekaterinburg, Russia

e-mail: mgurskaya@yandex.ru

Abstract. Extending hydroclimatic time series is a critical task in hydrology and climatology. Tree rings from riparian forests offer a valuable proxy for reconstructing hydrological parameters. While tree-ring-based streamflow reconstructions are established in northern and arid ecosystems, such studies are absent for temperate climates. A consensus is also lacking on whether water level or water discharge is more suitable for reconstruction. This study analyses relationships between mean monthly water levels and discharge of the Tura River (Turinsk gauge) and ring

widths of *Populus nigra* L. (poplar) and *Salix alba* L. (willow), to reconstruct these variables and identify extreme hydrological years. Ring-width measurements were obtained from tree cores. Cross-dated individual series were used to build standardized residual chronologies for poplar (1876–2022) and willow (1879–2022). Correlation analysis has shown a stronger relationship between the poplar chronology and May water levels, and willow chronologies and April–May water levels, than with corresponding discharge data. Linear regression was used to reconstruct both hydrological variables. Despite higher correlation coefficients with water levels, the reconstruction models for level and discharge were similar. However, the water level model better captured extreme hydrological years. These strong associations during extreme years are attributed to the wide floodplain of the Tura River. Periods of high and low streamflow were successfully identified. The results confirm that poplar and willow from the river floodplain are reliable proxies for hydrological changes in the southern taiga of Western Siberia.

Keywords: water levels and water discharge; black poplar; white willow; tree-ring width; tree-ring chronologies; reconstructions; extreme years; southern taiga; Western Siberia.

For citation: Gurskaya M. A., Agafonov L. I., Yermolenko M. O. Prolongation of hydrological rows of water levels and discharge using dendrochronological reconstructions on example of black poplar and white willow in Western Siberia. *Hydrosphere. Hazard processes and phenomena*, 2025, vol. 7, iss. 3, pp. 274–285. DOI: 10.34753/HS. 2025.7.3.274. (In Russian; abstract in English).

Введение

Большинство массовых, систематических и стандартизированных инструментальных измерений гидроклиматических параметров в России систематически ведутся с середины 1930-х годов XX века [1]. Столетние ряды наблюдений редки, и часто они связаны с неоднородностями, обусловленными изменениями в инструментальных средствах, окружающей среде и практике наблюдений [2, 3]. Поэтому поиск косвенных источников данных о гидроклиматических событиях в прошлом очень важен.

Дендрохронологический анализ часто используется для реконструкции различных гидроклиматических событий. Годичные кольца деревьев, произрастающих в поймах рек содержат информацию об их гидрологическом режиме [4–7]. В дендрохронологических реконструкциях наиболее часто используются количественные оценки гидрологического режима, а именно расходы воды в м³/с [4–13]. Эти измерения имеют объективную оценку количества воды, проходящей через живое сечение реки в единицу времени.

Расход воды является одной из ключевых характеристик потока, определяющих другие его параметры, включая уровень. Зависимость $Q = Q(H)$ для определенного участка водотока устанавливается экспериментально и выражается в виде кривой расхода, которая является

эмпирической. Однако организмы и экосистемы могут быть более чувствительны к уровням воды, а не к расходам воды. Это связано с прямым воздействием воды неподвижные элементы биологических систем.

В северных бореальных лесах и в аридных экосистемах исследования влияния гидрологических параметров на прирост деревьев достаточно результативны [8–13]. В экосистемах, находящихся в более мягких климатических условиях и не испытывающих воздействия лимитирующих климатических факторов на прирост деревьев, подобных исследований не проводилось. Например, в настоящее время нет исследований влияния стоковых характеристик рек на годичный прирост деревьев в поймах южной тайги Западной Сибири.

Цель этой работы – оценить как уровни и расходы воды влияют на годичный прирост деревьев, произрастающих в пойме реки Тура в подзоне южной тайги, и оценить, какие гидрологические параметры будут более точно реконструированы с помощью годичных колец.

Материалы и методы исследования

Гидрологические характеристики реки Тура составлены на основе анализа данных, опубликованных в различных источниках. Расходы и уровни воды, даты ледохода и ледостава получены на основе Гидрологических

ежегодников [14, 15], климатические данные загружены с сайта Climate Explorer, версия CRU4.07 период наблюдений 1901–2022 гг. [16–18]; данные по эвапотранспирации с базы данных GLEAM v3.6B (Global Land Evaporation Amsterdam Model) [19] и с сайта Climate Explorer, версия CRU4.07, период наблюдений 1979–2022 гг.; данные по растительному покрову из баз данных GLAD (Global Land Cover and Land Use Change) [20] и Global watersheds [21], период наблюдений 2000–2022 гг.

Район сбора образцов находится на правом берегу реки Тура в подзоне южной тайги 58,4° с.ш. 62,8° в.д. Здесь река формирует большой меандр, часто затапливаемый водой во время весеннего половодья, где произрастают деревья тополя черного (*Populus nigra* L.) и ивы белой (*Salix alba* L.). Буровые образцы (керны) были собраны с деревьев, растущих в пойме вдоль уреза воды, в количестве 50 шт. (ива) и 76 шт. (тополь). Керны были отполированы и измерена ширина древесных колец с помощью Lintab 5.0. Полученные древесно-кольцевые серии были перекрёстно датированы с использованием пакетов TSAP [22] и COFESHA [23] с целью определить точный календарный год формирования каждого кольца и выявить ложные или выпадающие кольца. Перекрестная датировка – метод определения календарной даты формирования годичного кольца с помощью сравнения графиков динамики ширины колец и установления максимального соответствия между ними. Полученные древесно-кольцевые серии были стандартизированы и проиндексированы в программе ARSTAN с использованием функций кубического сплайна [24, 25]. В результате индексации путем усреднения были получены древесно-кольцевые хронологии. Для характеристики хронологий использовали стандартные статистические параметры. Самый очевидный – это ширина годичных колец, которая отражает общий природный фон места произрастания деревьев. Коэффициент чувствительности, который вычисляется путем нахождения абсолютного значения разности соседних значений ширины колец, деленной на их среднюю величину, позволяет оценить изменчивость прироста в ответ на динамику условий окружающей среды. Автокорреляция

показывает влияние условий предшествующих лет. Для статистического анализа важно уменьшить значения автокорреляции до пренебрежимо малых значений. Для этого каждый ряд «отбеливается» с помощью подходящей модели автокорреляции для временных рядов, в результате создается выбеленная хронология или хронология остатков (residual chronology) [24]. Хронология остатков является основным инструментом, с которой используется для дальнейшего анализа данных. Качество полученной хронологии оценивалось при помощи Rbar (коэффициент межсерийной корреляции) и EPS – выраженность популяционного сигнала в хронологии – насколько наша совокупность данных описывает гипотетическую хронологию, построенную бесконечному числу деревьев. Значение EPS, превышающее 0,85, является достаточным, чтобы хронология считалась достоверно представляющей общий сигнал на выбранном местообитании [24].

Для дендроклиматического анализа были использованы месячные данные по температуре и осадкам, полученные с сайта Climate Explorer, версия CRU4.07 период наблюдений 1901–2022 гг. и данные по средним месячным уровням и расходам воды с гидропоста Туринск (1936–2021 гг.), расположенного ниже по течению от места отбора образцов древесины. Статистический анализ проводился с использованием программы Statistica 6.0 и DendroClim2002 [26]. Реконструкции уровней воды выполнены с использованием линейной регрессии. Сравнение актуальных данных и реконструированных уровней, и расходов выполнено в пакете DPL (Dendrochronological Program Library) рутина – VFY [27].

Результаты

Гидроэкологическая характеристика реки Тура. Площадь водосбора реки Тура 80 400 км², длина реки – 1030 км, средний расход воды – 202 м³/с. Река Тура характеризуется выраженным весенним половодьем, повышенным летним стоком, сопровождаемым паводками, и низкой осенне-зимней меженью. Ледоход в среднем наблюдается с 18 апреля ± 8 дней. Максимум весеннего половодья приходится на середину мая (средние многолетние сроки – 10

мая ± 12 дней). Половодье длится до 2 месяцев, с выраженным пиком в мае. Сроки наступления ледостава – 16 ноября ± 17 дней в среднем, но в XXI веке ледостав наступает позже – 28 ноября ± 11 дней, а в период 1960–1990 гг. река замерзала к 15 ноября. Таким образом, длительность периода открытого русла увеличилась с 205 до 215 дней в последние годы за счет более позднего наступления ледостава. Ширина поймы в районе сбора образцов достигает 8 км, а местами река разливается до 12 км.

Годовое количество осадков на водосборном бассейне в пределах Свердловской области составляет 518 мм в год, а годовая эвапотранспирация – 438 мм. Эвапотранспирация превышает количество осадков в апреле–июле с максимумом в июне–июле (88 мм/месяц соответственно). Расходы в период майского половодья составляют 35 %, в период открытого русла (июнь–сентябрь) – 36 %, в период закрытого русла – 28 %. Средние многолетние значения майских расходов по данным гидропоста Туринск составляют $545 \text{ м}^3/\text{с}$, а средние многолетние – $131 \text{ м}^3/\text{с}$.

Зависимость уровни–расходы.

Большую часть расход воды в реке Тура меняется линейно с изменением уровня. Изменение уровня воды прямо влияет на параметры потока и, следовательно, на его расход. Линейность связи наблюдается, пока река находится в пределах своего русла. Связь между уровнями и расходами за год и за период открытого русла согласуется между собой. В мае линейная зависимость между уровнями и расходами становится меньше. При высоких уровнях воды, например, в половодье, когда вода выходит из русла пойму на заливные луга, связь становится нелинейной. Расходы продолжают увеличиваться, а уровни воды прирастают незначительно. При достижении 700 см уровня и $800 \text{ м}^3/\text{с}$ расходов река выходит

из своего основного русла и заливает пойму и окрестные луга до 8 км. Увеличение уровня реки выше 700 см на 20–30 см ведет к увеличению расходов практически в 1,5 раза до $1500 \text{ м}^3/\text{с}$. В период половодья в мае достижение уровня воды высоты 800 см ведет к увеличению расходов до $1000 \text{ м}^3/\text{с}$, а в дальнейшем незначительное увеличение уровня ведет к существенному росту расходов (рисунок 1).

Древесно-кольцевые хронологии. В результате измерения ширины годовых колец и перекрестной датировки индивидуальных серий получено, большинство деревьев тополя, несмотря на диаметр более 40 см, оказались молодыми, число колец в них не превышало 40, поэтому они были исключены из анализа. В анализ вошло только 27 деревьев. У ивы белой все образцы были использованы для построения хронологии. Длительность древесно-кольцевой хронологии по тополи черному составила 148 лет (с 1876 г.), а по иве – 143 года (с 1879 г.). Выпадающих и ложных колец на ядрах не выявлено. Средняя ширина годовых колец тополя составила $3,8 \pm 1,9$ (среднеквадратичное отклонение) мм, ивы – $4,4 \pm 1,9$ мм. Коэффициент межсерийной корреляции показывает сходство между отдельными сериями и составляет 0,60 и 0,61. Коэффициент чувствительности, показывающий относительную величину межгодовой изменчивости прироста, у неиндексированных серий составил 0,35 и 0,33, а у индексированных серий – 0,31 и 0,30 соответственно. Следовательно, деревья имеют среднюю чувствительность к условиям окружающей среды. Средняя автокорреляция в сериях после детрендига составила 0,22 и -0,1. Корреляция между индексированными сериями (R_{bar}) оказалась невысокой – 0,56 и 0,51 соответственно. Тем не менее, EPS обобщенных хронологий оказался 0,91 и 0,89 на всем протяжении хронологий. Корреляция между обобщенными хронологиями тополя и ивы достаточно тесная ($r=0,54$).

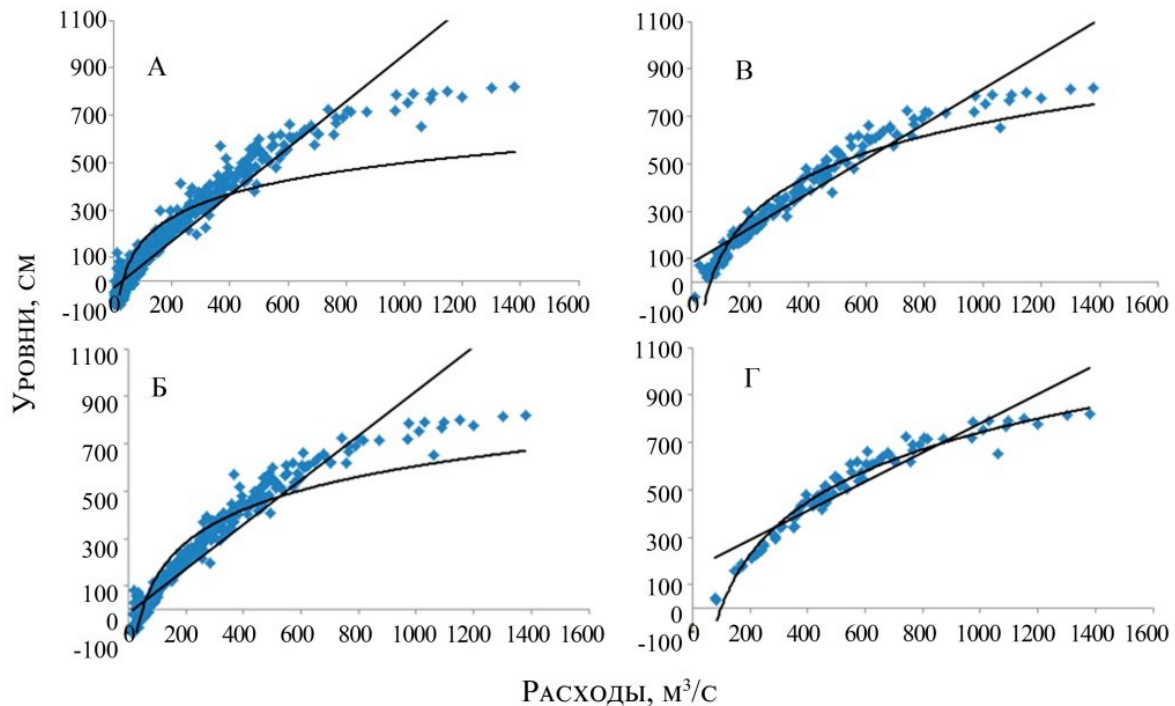


Рисунок 1. Связь между уровнями и расходами за А – весь период наблюдений, Б – период открытого русла, В – период разрушения ледового покрова, Г – период половодья (май). Приведены линейный и логарифмический тренды, описывающие зависимости уровни-расходы

Figure 1. The relationship between water level and discharge for А – full observation period, Б – period of open channel, В – ice cover destruction period, Г – flood period (May). Linear and logarithmic trends describing the water level-discharge relationships are shown

Гидроклиматический анализ.

Корреляционный анализ связей ширины годичного кольца с уровнями и расходами воды показал, что на прирост тополя на Туре влияют уровни и расходы воды в мае. На прирост ивы влияют уровни и расходы воды в апреле и мае. В обоих случаях уровни имеют более тесную корреляцию с хронологиями, чем расходы (рисунок 2).

Дополнительно проанализированы связи с температурой воздуха и осадками. Температура мая и июля положительно влияет на ширину годичных колец деревьев, произрастающих на Туре, в период 1936–1970 гг. ($r_{\text{май}}=0,35$, $r_{\text{июль}}=0,33$), а в период 1970–2023 гг. значимых связей не выявлено. Оценка связей осадками показала, что средние месячные осадки не влияют на ширину годичного кольца. Следовательно, деревья не испытывают дефицита воды.

На основе полученных корреляций были реконструированы уровни и расходы воды.

Полученные реконструированные кривые были сравнены с актуальными данными. Результаты приведены в таблице 1. Получено, что обе древесно-кольцевые хронологии лучше реконструирует уровни воды, по сравнению с расходами. Наиболее точные погодичные реконструкции получены для среднего значения уровней воды в апреле–мае по иве белой, где объяснимая дисперсия составила более 24 % за весь период наблюдений и более 26 % за период 1970–2023 гг. Сглаженные 11-летним фильтром ряды имеют более высокие значения объяснимой дисперсии (51–53 %) по уровням воды у обоих видов и очень высокий процент положительных совпадений. Однако, реконструкция расходов по тополи выявила, что расходы воды за период 1970–2017 гг. влияют до 59 % на прирост, но доля совпадений при этом мала. Несмотря на высокую объяснимую дисперсию, качество реконструкции сглаженных расходов, скорее всего, низкое, из-за большой доли несовпадений.

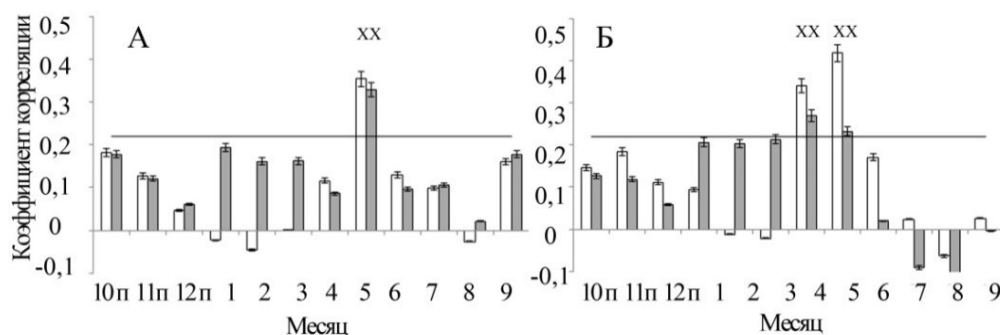


Рисунок 2. Связь между уровнями (белые столбики) и расходами (серые столбики) воды и шириной годовичного кольца. А – тополь черный, Б – ива белая. Горизонтальная линия – уровень значимости. х – достоверные значения, p -level < 0,05

Figure 2. Relationship between water levels (white bars) and discharges (gray bars) and tree-ring width. А – black poplar, В – white willow. The horizontal line – significant level. х – significant values, p -level < 0,05

Таблица 1. Сравнение реконструированных и актуальных значений уровней и расходов. * – статистически достоверные значения. R^2 – объяснимая дисперсия, r – коэффициент корреляции, RE – коэффициент уменьшения ошибки, t-value – Т тест, Sign test – тест знаков: «+» – число случаев совпадения, «-» – расхождения, * – статистические достоверные. Жирным выделены значения наибольшей объяснимой дисперсии, жирным курсивом – высокая дисперсия, но низкая доля совпадений (sign test)

Table 1. Comparison of reconstructed and actual values of river levels and discharge of water. * – statistically significant values. R^2 – explained variance, r – correlation coefficient, RE – reduction of error coefficient, t-value – T test, Sign test – “+” – matches positive, “-” – matches negative, * – statistically significant values. Bold – the highest explained variance, bold italics – high explained variance, but low matches positive (sign test)

Род дерева, месяц	Параметр	Период	R^2	r	RE	t-value	Sign test
Ряды погодичных данных							
<i>Populus</i> , май	Уровни	1936-2023	0,15	0,39*	0,15*	2,81*	54+/34-
	Расходы	1936-2021	0,10	0,32*	0,11*	2,21*	57+/29-
<i>Salix</i> , апрель-май	Уровни	1936-2023	0,24	0,49*	0,24*	2,39*	58+/27-
	Расходы	1936-2021	0,19	0,43*	0,19*	2,65*	58+/27-
<i>Populus</i> , май	Уровни	1970-2023	0,26	0,51*	0,20*	2,22*	31+/23-
	Расходы	1970-2021	0,17	0,41*	0,11*	1,71	33+/19-
<i>Salix</i> , апрель-май	Уровни	1970-2023	0,37	0,61*	0,31*	3,04*	34+/20-
	Расходы	1970-2021	0,27	0,52*	0,21*	2,88*	32+/20-
Сглаженные 11-летним фильтром ряды							
<i>Populus</i> , май	Уровни	1942-2017	0,10	0,32*	0,11*	2,61*	41+/35-
	Расходы	1942-2015	0,12	0,35*	0,09*	4,11*	37+/37-
<i>Salix</i> , апрель-май	Уровни	1942-2017	0,51	0,71*	0,40*	6,70*	42+/6-
	Расходы	1942-2015	0,19	0,43*	0,19*	2,65*	61+/27-
<i>Populus</i> , май	Уровни	1970-2017	0,53	0,73*	0,31*	6,23*	41+/7-
	Расходы	1970-2015	0,59	0,77*	0,08*	2,68*	26+/20-
<i>Salix</i> , апрель-май	Уровни	1970-2017	0,51	0,71*	0,11*	3,39*	20+/28-
	Расходы	1970-2015	0,41	0,64*	0,07*	3,24*	21+/25-

На рисунке 3 приведено графическое сравнение погодичной реконструкций уровней и расходов воды по ширине годовичных колец с измеренными значениями. Получено, что реконструкции уровней воды гораздо чаще описывают максимальные значения уровней,

тогда как по расходам чаще встречается недооценка или переоценка пиковых значений (рисунок 3 Б, Г). Во всех реконструкциях отмечена недооценка экстремальных значений

минимальных уровней и расходов воды с использованием хронологии по тополю. По иве получены более точные реконструкции уровней воды экстремальных лет.

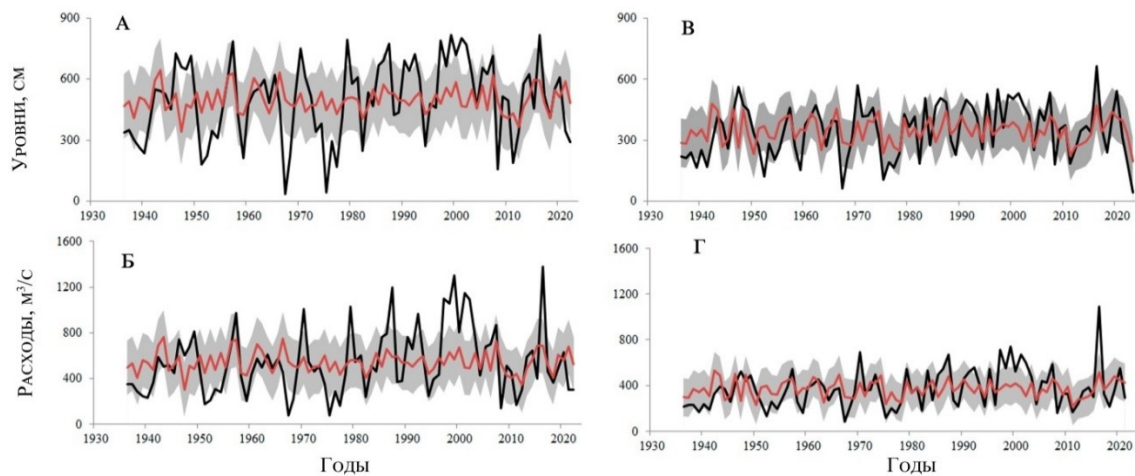


Рисунок 3. Графическая оценка реконструкции уровней (А, В) и расходов воды (Б, Г) древесно-кольцевыми хронологиями: А, Б – тополь черный (май), В, Г – ива белая (апрель-май). Черная линия – измеренные значения, красная – реконструированные. Заливка серым – доверительный интервал 5–95 %

Figure 3. Graphical assessment of the reconstruction of water levels (A, B) and water discharges (B, G) using tree-ring chronologies: А, Б – black poplar (May), В, Г – white willow (April-May). Black line – measured values, red line – reconstructed values. Gray filling – confidence interval 5–95 %.

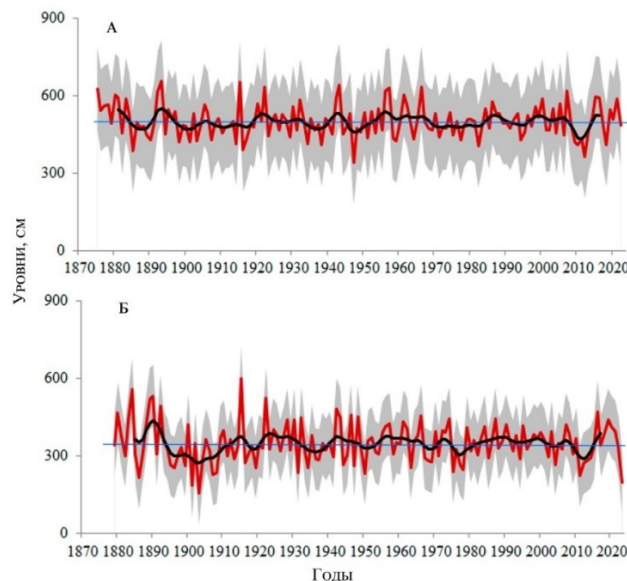


Рисунок 4. Реконструкции уровней воды древесно-кольцевыми хронологиями: А – тополь черный (май), Б – ива белая (апрель-май). Красная линия – измеренные значения, черная – сглаженные 11-летним фильтром, синяя горизонтальная линия – средние значения. Заливка серым – доверительный интервал 5–95 %

Figure 4. Reconstructions of water levels, based on tree-ring chronologies: А – black poplar (May), Б – white willow (April-May). Red line – reconstructed values, black line – 11-year smoothed values, blue line – mean value. Gray filling – confidence interval 5–95 %

На рисунке 4 приведена реконструкция ежегодных уровней воды и их сглаженных 11-летним фильтром значений. Учитывая, что значения EPS становятся выше 0,85 с самого начала хронологии, то можно использовать всю длину хронологии для анализа. Благодаря сглаживанию, удалось выделить периоды с низкими и высокими уровнями воды, как в мае, так и в апреле–мае. Периоды с приростом выше средних многолетних значений у обоих видов отмечены в 1885–1895 гг. и в 1920–1930 гг., эти периоды соответствуют периодам с высокой водностью. Периоды с угнетением прироста отмечены в 1895–1915 гг. и 1930–1935 гг. В эти периоды уровень воды был скорее низким. В хронологии ивы периоды снижения уровня воды более выражены, чем в хронологии тополя.

Обсуждение

Река Тура является одной из крупнейших рек Свердловской области с широкой поймой. Сроки разрушения ледового покрова и начало ледохода происходят в среднем апреле, а весеннее половодье – в мае. Во время весеннего половодья река широко разливается и достаточно часто выходит за пределы бровки своего русла, формируя заливные луга. В этот же период река оказывает существенное влияние на прирост деревьев, произрастающих в пойменных местообитаниях.

Произрастая в сходных местообитаниях вдоль уреза воды, тополь и ива имеют близкие характеристики динамики изменения ширины годовых колец. Тем не менее, гидроклиматический сигнал, содержащийся в годовых кольцах, различен. Эти различия обусловлены на наш взгляд тем, что ива начинает вегетацию несколько раньше и, соответственно, для формирования ширины годовых колец важным является уровни и расходы воды в апреле и мае. Тополь – более теплолюбивый вид, здесь проходит его северная граница распространения [28], поэтому начало формирования годового кольца наступает позднее, чем у ивы и это отражается в связях только с уровнями и расходами воды в мае.

Более тесная связь радиального прироста *Populus nigra* и *Salix alba* в пойме реки Тура с

уровнями воды, а не с её расходами связана, по нашему мнению, с гидравлическими особенностями поймы реки Тура в этом месте. В данном меандре при превышении уровнями воды отметок русловой бровки, происходит растекание потока до 8 км в ширину. Это приводит к выраженной нелинейности в соотношении «уровень-расход» [29]. Для деревьев, в свою очередь, ключевым фактором, влияющим на ширину годового кольца, становится непосредственно продолжительность и глубина затопления слоем воды в период весеннего половодья, который точнее характеризуется уровнем, а не интегральным расходом в главном русле. На других местообитаниях, где вода не покидает пределов речного русла, уровни и расходы воды скорее будут влиять одинаково на годичный прирост. Но поскольку тополь черный и ива белая, предпочитают селиться на временно заливаемых участках поймы, то их чувствительность к уровню, а не к расходу воды, будет выше на подобных местообитаниях.

Выполненные реконструкции уровней воды выглядят точными, начиная с 1970 года. Возможно, это связано с унификацией и стандартизацией данных в этот период и улучшением качества измерений в последующие годы [30]. Другой причиной расхождения реконструкции и наблюдений за уровнями воды до 1970 года могут быть особенности динамики климата в предшествующие десятилетия (1940–1960 гг.), когда влияние температуры могло быть сильнее, чем влияние уровней и расходов воды. Однако, несмотря на различия в коэффициентах корреляции между температурой и шириной годового кольца за период 1936–1970 и 1970–2023 гг., статистически достоверных температурных различий в эти периоды не выявлено. Средняя температура мая–июня в эти периоды составила $14,5 \pm 4,5$ °C и $14,7 \pm 4,3$ °C соответственно. Кроме этого, важным фактором, влияющим на прирост деревьев, является запас воды в почве. Оба вида деревьев чувствительны к запасам почвенной влаги и доступностью воды в почве [31–35]. Поскольку прослеживается влияние нескольких факторов, то иногда наблюдаются несовпадения между реконструированными рядами и измеренными значениями.

Фактические максимальные или минимальные значения прироста иногда не соответствуют максимальным или минимальным значениям уровней воды. Например, 1947, 1984 и 1999 гг. являются годами с высоким значением уровней воды, но в эти годы отмечено уменьшение прироста до средних значений. Возможно, длительное затопление напрямую определяет условия вегетации и наступление водного стресса у изучаемых видов. В 1952, 1959 и 1967 гг. отмечены широкие кольца относительно средних значений, а уровни воды – наименьшие, то есть в эти годы существует переоценка уровней воды предложенной моделью. Остальные годы с минимальными и максимальными уровнями реконструированы достаточно точно.

Согласно полученной реконструкции, можно выделить период с 1895 года по 1915 год с низкими уровнями воды в реке Тура. Это один из самых длительных периодов с низкой водой за время, охватываемое хронологиями. В этот период у обоих видов отмечено существенное уменьшение прироста, следовательно, снижение уровня воды в период весеннего половодья было существенным. Тем не менее, снижение уровня воды в мае, согласно реконструкции, не достигало современных значений, зафиксированных в период 2010–2015 гг.

Годы с высокой водностью, способствующей приросту тополя – 1892, 1893, 1915 и 1922 гг., а по хронологии ивы – 1884, 1889, 1890, 1892, 1915 и 1922 гг. Учитывая особенности роста ивы и тополя, можно предположить, что в 1892, 1915, и 1922 гг. наблюдались высокие уровни воды в апреле и мае. Условия, угнетающие прирост у обоих видов, и, возможно, сопровождающиеся низкими уровнями воды в мае – в 1914, 1916 и 1934 годах. Но следует быть осторожными при оценке отдельных лет с узкими годовыми кольцами и не исключать вариант, что экстремально высокое половодье могло оказать отрицательное воздействие на годичный прирост, в результате чего некоторые годы с узкими кольцами могут не соответствовать значениям минимальных уровней и расходов воды.

Заключение

Проведенное исследование позволило установить закономерности влияния гидрологического режима реки Тура на радиальный прирост пойменных деревьев. В результате анализа выявлено, что динамика уровней воды лучше регистрируется годовыми кольцами деревьев тополя черного и ивы белой по сравнению с расходами воды. Это обусловлено процессами, происходящими в период весеннего половодья в широкой пойме реки Тура, где при выходе воды из русла связь «расход–уровень» становится нелинейной. В этих условиях именно уровень воды, а не интегральный расход в главном русле, является адекватным показателем влияния продолжительности и глубины затопления пойменной террасы на годичный прирост деревьев.

На основе древесно-кольцевых хронологий выявлены периоды с высокими и низкими уровнями воды и экстремальные годы с высокой и низкой водностью за период, предшествующий инструментальным наблюдениям. Древесно-кольцевые хронологии *Populus nigra* L. и *Salix alba* L., произрастающих в пойменных местообитаниях реки Тура в условиях южной тайги Западной Сибири, демонстрируют хороший потенциал в качестве индикаторов динамики гидрологического режима, позволяют продлить гидрологические ряды и выявить периоды с высокой и низкой водностью. Разработанные модели позволяют использовать дендрохронологический метод для ретроспективной оценки динамики режима уровней реки Тура, что имеет фундаментальное значение для понимания долгосрочных изменений гидроклиматической системы и прогнозирования ее состояния в условиях современного изменения климата.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФ 24-27-20081.

Acknowledgements

This work was supported by the Russian Science Foundation on project 24-27-20081.

Литература / References

1. Bulygina O.N., Razuvaev V.N. Daily Temperature and Precipitation Data for 518 Russian meteorological stations (1881–2010). Oak Ridge, TN: Oak Ridge National Laboratory. 2012. №.osti: 1394916. DOI: 10.3334/CDIAC/CLI.100.
2. Tveito O.E. The effect of homogenization when constructing long-term gridded monthly precipitation and temperature data. *International Journal of Climatology*, 2023, vol. 43, no. 16, pp.7618–7632.
3. WMO guidelines on homogenization. Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization. Technical report WMO-No. 1245. 2020. 54 p.
4. Agafonov L.I., Gurskaya M.A. The Influence of the Lower Ob River Runoff on Radial Growth of Trees. *Contemporary Problems of Ecology*, 2013., vol. 6, no. 7, pp. 779–787. DOI:10.1134/S1995425513070159.
5. Agafonov L.I., Meko D.M., Panyushkina I.P. Reconstruction of Ob River, Russia, discharge from ring widths of floodplain trees. *J. of Hydrology*, 2016, vol. 543, pp. 198–207. DOI:10.1016/j.jhydrol.2016.09.031.
6. Karanitsch-Ackerl S., Mayer K., Gauster T., Laaha, G., Holawe F., Wimmer R., Grabner M. A. 400-year reconstruction of spring–summer precipitation and summer low flow from regional tree-ring chronologies in North-Eastern Austria. *J. of Hydrology*. 2019, vol. 577. pp. 123986. DOI:10.1016/j.jhydrol.2019.123986.
7. Woodhouse C.A., Gray S.T., Meko D.M. Updated streamflow reconstructions for the Upper Colorado River Basin. *Water Resource Research* 42, 2006, vol.42, no. 5. W05415. DOI:10.1029/2005WR004455.
8. Güner H.T., Kose N., Harly G.T. A 200-year reconstruction of Kocasu River (Sakarya River Basin, Turkey) streamflow derived from a tree-ring network. *Int. J. Biometeorol.*, 2017, vol. 61, pp. 427–437. DOI:10.1007/s00484-016-1223-y.
9. Bakhtiyorov Z., Chen F., Chen Y. Wang, S., Zhang, H., Hu, M. Yue W., Habibulloev S., Kavtaradze G., Gurskaya M., Agafonov L., Rahmonov O., Roibu C.-C. Akkemik U., Köse N., Norman C. Historical drivers and future streamflow variations of the Kura River in the Western Transcaucasia region of Georgia: Analysis of tree-ring chronologies from 1720 to 2021 CE. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2024, vol. 655, p. 112529. DOI:10.1016/j.palaeo.2024.112529.
10. Gao Z., Zhang H., Chen F. Satylkanov R., Ermenbaev B., Bakhtiyorov Z., Zhang R., Yu S., YUE W., Zhao X. Tree-ring based streamflow reconstruction of the Chu River in Kyrgyzstan over the past 407 years. *Quaternary Sciences*, 2022. vol. 42. no. 1, pp. 288–301. DOI: 10.11928/j.issn.1001-7410.2022.01.23.
11. MacDonald G.M., Kremenetski K.V., Smith L.C., Hidalgo H.G. Recent Eurasian river discharge to the Arctic Ocean in the context of longer-term dendrohydrological records. *J. Geophysical Research: Biogeosciences*. 2007. vol.112. G04S50. DOI:10.1029/2006JG000333.
12. Meko D.M., Panyushkina I.P., Agafonov L.I., Edwards J.A. Impact of high flows of an Arctic river on ring widths of floodplain trees. *The Holocene*, 2020, vol. 30, no. 6, pp. 789–798. DOI:10.1177/0959683620902217.
13. Gou X., Chen F., Cook E., Jacoby G., Yang M., Li J. Streamflow variations of the Yellow River over the past 593 years in western China reconstructed from tree rings. *Water Resources Research*, 2007, vol. 43, W06434. DOI:10.1029/2006WR005705.
14. Гидрологический ежегодник 1936–1954, ГУГМС. Л.: Гидрометеиздат, 1937–1955, Т.6. Вып. 0–9.
15. Гидрологический ежегодник 1955–2023. Омск: ГУГМС, Обь-Ирт. УГМС, 1956–2018, Т. 1. Вып. 10–11.
16. Fick S.E., Hijmans R.J. “WorldClim 2: New 1-km Spatial Resolution Climate Surfaces for Global Land Areas.” *International Journal of Climatology*, 2017, vol. 37, no. 12, pp. 4302–15. DOI:10.1002/joc.5086.

17. Harris I., Osborn T.J., Jones P., Lister D. Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset. *Scientific Data*, 2020, vol.7, no. 109. DOI:10.1038/s41597-020-0453-3.
18. Osborn T.J., Jones P.D., Lister D.H., Morice C.P., Simpson I.R., Winn J.P., Hogan E., Harris I.C. Land surface air temperature variations across the globe updated to 2019: The CRUTEM5 data set. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2021, vol. 126., no. 2. C. e2019JD032352.
19. Martens, B., Miralles, D.G., Lievens, H., Schalie R., Jeu R.A.M. Fernández-Prieto D., Beck H.E., Dorigo W.A., Verhoest N.E.C. GLEAM v3: satellite-based land evaporation and root-zone soil moisture. *Geoscientific Model Development*, 2017, vol. 10, pp. 1903–1925. DOI:10.5194/gmd-10-1903-2017.
20. Potapov P., Hansen M.C., Pickens A., Hernandez-Serna A, Tyukavina A., Turubanova S., Zalles V., Li X., Khan A., Stolle F., Harris N., Song X., Baggett A., Kommareddy I., Kommareddy A. The global 2000–2020 land cover and land use change dataset derived from the Landsat archive: first results. *Frontiers in Remote Sensing*, 2022. DOI:10.3389/frsen.2022.856903.
21. Giachetta E., Willett S. D. A global dataset of river network geometry. *Scientific data*, 2018, vol. 5, iss. 1, p. 180127.
22. Rinn F. TSAP Time Series Analysis and Presentation. Version 3.0. Reference Manual / F. Rinn. Heidelberg. 1996. 262 p.
23. Holmes R.L. Computer-assisted quality control in tree ring dating and measurement. *Tree-Ring Bul.*, 1983, vol. 43, pp. 69–78.
24. Bitvinskas T., Briffa K., Cook E., Downing D.J., Dubinskaite J., Eckstein D., Fritts H.C., Gordon G.A., Guiot J., Jones J. I. PH., Jagels R., Jones PH., Kairiukstis L., Kincaid W.B., Kocharov G., Kolishchuk V.G., Mazepa V.S., McLaughlin S.B., Molenaar J., Nash III T.H., Norton D., Ogden J., PILCHER J., Robinson W.J., Schweingruber F., Serre-Bachet F., Shiyatov S.G., Telewski F., Tessier L., Vaganov E.A., Visser H., Worbes M. *Methods of dendrochronology: applications in the environmental sciences.* (Cook E., Kairiukstis L. Eds.) Springer Dordrecht: Kluwer Academic Publishers. 1990. 394 p. DOI:10.1007/978-94-015-7879-0.
25. Cook E. R., Krusic P. J., Holmes R. H., Peters K. Program Arstan. Version, 2005, vol.1, p. 72.
26. Biondi F., Waikul K. DENDROCLIM2002: A C++ program for statistical calibration of climate signals in tree-ring chronologies. *Computers & geosciences*, 2004, vol. 30, no 3, pp. 303–311.
27. Holmes R.L. *Dendrochronology Program Library, Instruction and Program Manual* // Tucson: Laboratory of Tree-Ring Research, University of Ari. 1992. 51 p.
28. GenRes Bridge Project Consortium, ECPGR, ERF and EUFORGEN // Genetic Resources Strategy for Europe. 2021. URL: <http://www.genresbridge.eu/GRS4E>.
29. Knighton D. *Fluvial forms and processes: a new perspective.* Routledge. 2014. 400 p. DOI:10.4324/9780203784662.
30. Потапова О.Н. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам // Л.: Гидрометеоиздат. 1978. №. 6. 384 с.
31. Dudek D.M., McClenahan J.R., Mitsch W.J. Tree growth responses of *Populus deltoides* and *Juglans nigra* to streamflow and climate in a bottomland hardwood forest in central Ohio. *The American midland naturalist* 1998 vol. 140 no. 26 pp. 233–244. DOI:10.1674/0003-0031(1998)140[0233:TGROPD]2.0.CO;2.
32. Malik I., Dłużewski M., Rotnicka J., Wistuba M., Krzemień K., Muszyński A., Rojan E., Ślęzak A. Simultaneous growth releases and reductions among *Populus alba* as an indicator for floods in dry mountains (Morocco). *Ecological Indicators*, 2021, vol. 129, p. 107874. DOI:10.1016/j.ecolind.2021.107874

33. Liu P.X., Peng J.F., Chen F.H. Hydrological response of *Populus euphratica* Olve. radial growth in Ejinaa banner, inner Mongolia. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2007, vol. 49, no. 2, pp. 150–156. DOI:10.1111/j.1744-7909.2007.00425.x.
34. Zhang R., Qin L., Yuan Y., Gou X., Zou C., Yang Q., Shang H., Fan Z. Radial growth response of *Populus xjrtyschensis* to environmental factors and a century-long reconstruction of summer streamflow for the Tuoshigan River, northwestern China. *Ecological Indicators*, 2016, vol. 71, pp. 191–197. DOI:10.1016/j.ecolind.2016.06.035.
35. Lambs L., Loubiat M., Girel J., Tissier J., Peltier J. P., Marigo G. Survival and acclimatation of *Populus nigra* to drier conditions after damming of an alpine river, southeast France. *Annals of Forest Science*, 2006, vol. 63, no 4, pp. 377–385. DOI:10.1051/forest:2006018.

Поступила в редакцию / Received 21.11.2025

Принята к публикации / Accepted 07.12.2025

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Гурская Марина Анатольевна, доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник, Институт экологии растений и животных УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия, SPIN-код: 7010-1752, <https://orcid.org/0000-0001-5815-7228>, ResearcherID ABF-1384-2020, Author ID Scopus: 6507383427, e-mail: mgurskaya@yandex.ru.

Агафонов Леонид Иванович, доктор биологических наук, заведующий лабораторией, Институт экологии растений и животных УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия, SPIN-код: 1809-2486, <https://orcid.org/0000-0003-4595-4978>, ResearcherID O-7755-2014, Author ID Scopus: 6603717263, e-mail: lagafonov@ipae.uran.ru.

Ермоленко Максим Олегович, магистрант, Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург, Россия, e-mail: yermaxim@yahoo.com.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Marina A. Gurskaya, D.Sc (Biology), Leading Researcher, Institute of Plant and Animal Ecology, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia, SPIN-code: 7010-1752, <https://orcid.org/0000-0001-5815-7228>, ResearcherID ABF-1384-2020, Author ID Scopus: 6507383427, e-mail: mgurskaya@yandex.ru.

Leonid I. Agafonov, D.Sc (Biology), Head of Laboratory, Institute of Plant and Animal Ecology, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia, SPIN-code: 1809-2486, <https://orcid.org/0000-0003-4595-4978>, ResearcherID O-7755-2014, Author ID Scopus: 6603717263, e-mail: agafonov@ipae.uran.ru.

Maxim O. Yermolenko, master student, Ural Federal University, Yekaterinburg, Russia, e-mail: yermaxim@yahoo.com.