

УДК 550.384.34+550.385.1

Реконструкция и прогноз составляющих водного баланса в бассейне реки Нарын (Киргизия) по дендрохронологическим данным

© 2012 г. В.Г. Коновалов, О.Е. Максимова

Институт географии РАН, Москва

vladgeo@gmail.com

Статья принята к печати 10 мая 2012 г.

Водный баланс, гидроклиматический индекс, дендрохронология, множественная регрессия, прогноз, Тянь-Шань. Dendrochronology, forecast, hydroclimatological index, multiple regressions, Tien Shan, water balance.

Новый метод реконструкции годового объёма стока V включает в себя: 1) поиск информативных пунктов метеонаблюдений для получения достаточно тесной зависимости $V = f(HK)$; индекс климата HK содержит нормированные аномалии годовых осадков и температуры воздуха, а также упругости водяного пара и баллов общей облачности за июнь–сентябрь; 2) отбор репрезентативных хронологий ширины древесных колец W для зависимости $HK = f(W)$; 3) получение уравнения множественной линейной регрессии $V = f(W)$; 4) ввод новых переменных (индексы $PDSI/SPEI$) в уравнение $V = f(W)$. Рассчитан сток р. Нарын за 1700–2005 гг. по данным о W и с учётом временной изменчивости параметров уравнений множественной регрессии. Для 16 метеостанций Памира и Тянь-Шаня реконструированы многолетние ряды средней летней температуры воздуха T_s . Продолжительность рядов T_s составила от 100 до 278 лет. Получены положительные результаты прогноза: общего и ледниковой составляющей стока р. Нарын, а также многолетнего ряда максимальной плотности древесных колец.

Введение

Ширина и плотность годовичных колец деревьев формируются, в частности, под влиянием текущих и прошлых климатических условий: температуры и влажности воздуха, осадков, составляющих солнечной радиации, ветрового режима и пр. [13, 27]. На основе вековой и сверхвековой продолжительности датированных рядов ширины годовичных колец со времени работ А.Е. Дугласа (1901 г.) делаются попытки получения зависимостей между временными рядами различных природных процессов и показателями годовичного прироста древесных колец. Проблема эта весьма сложна и пока не имеет однозначного детерминированного решения, поскольку неклиматическая составляющая изменчивости многолетних рядов древесных колец, например, для лиственницы на Алтае [9], составляет 40–50% годового прироста древесины. Поэтому исследование и обоснование возможностей использования древесных колец для реконструкции и прогноза процессов природной среды и, в частности, гидрологического цикла имеют как научное, так и прикладное значение.

К настоящему времени накоплен опыт применения методов дендрохронологии для реконструкции пространственно-временной связи между плотностью и шириной годовичных колец деревьев и средними значениями годового и сезонного объёмов стока и их изменчивостью [25, 32, 34 и др.].

Древесно-кольцевые хронологии более или менее успешно использовались для реконструкции стока рек в горах Кавказа [8], Монголии [19], Северной Евразии [25], Восточного Тянь-Шаня [36]. Задача нашей работы — исследовать возможности реконструкции годового стока р. Нарын (Киргизия) на основе дендрохронологических данных. Эта реконструкция важна для прогнозов притока воды к Токтогульскому водохранилищу и каскаду ГЭС в бассейне Нарына, а также для исследований многолетних колебаний водных ресурсов в бассейне Аральского моря.

Основные характеристики и условия формирования стока р. Нарын

В водосборе этой реки формируется 14,544 км³, или 78,8% стока р. Сырдарья до Чардаринского водохранилища. Здесь же расположено Токтогульское водохранилище — крупнейшее в Центральной Азии, площадь акватории которого составляет 284,3 км², а длина — 65 км. Токтогульское водохранилище вместе с ГЭС играет ведущую роль среди аналогичных гидросооружений в бассейне Сырдарьи из-за значительного объёма накопления воды (более 1,7 среднегодового стока р. Нарын) и огромного энергетического потенциала.

Внутригодовое распределение стока Нарына по данным [14] трёх длиннорядных гидропостов, расположенных в верховье бассейна (гидропост г. Нарын, $F_{\text{бас}} = 10\,500$ км²), средней (гидропост

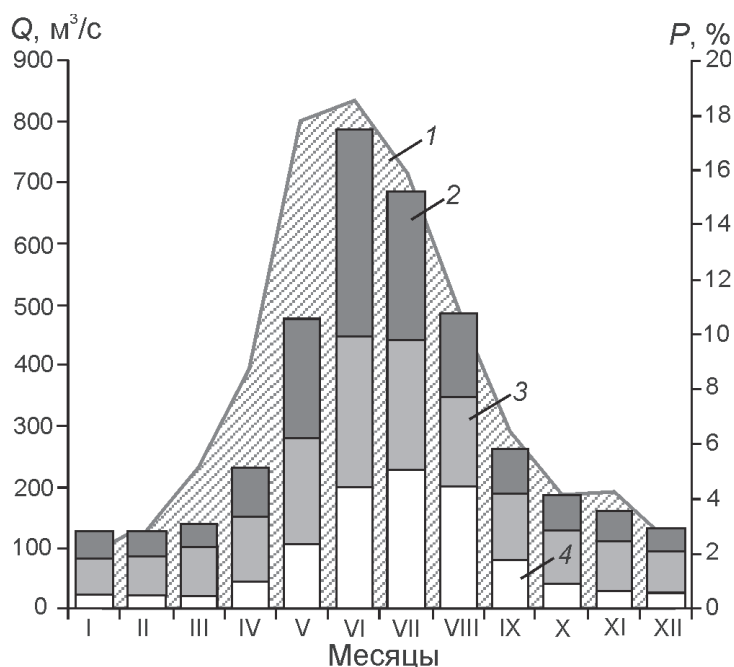


Рис. 1. Внутригодовое распределение стока (Q , $\text{м}^3/\text{с}$) по основному стволу Нарына и среднего относительного вклада (P , %) месячных осадков в годовую сумму.

1 – относительные вклады осадков; величины стока на трёх основных гидропостах в бассейне Нарына: 2 – Учтерек, 3 – Кекирим, 4 – г. Нарын

Fig. 1. Intra-annual distribution of the flow (Q , m^3/sec) on the main course of the Naryn river and average relative contribution (P , %) of monthly precipitation in the annual amount.

1 – the relative contributions of precipitation; runoff values of the three main runoff gauging stations in the basin of the Naryn: 2 – Uchterek, 3 – Kekirim, 4 – Naryn town

Кекирим, $F_{\text{бас}} = 34\,600 \text{ км}^2$) и нижней (гидропост Учтерек, $F_{\text{бас}} = 47\,000 \text{ км}^2$) его частях, характеризует рис. 1. Там же показано распределение среднего вклада месячных осадков в их годовую сумму, обобщённое по данным 14 метеостанций [33], находящихся в этом бассейне на высотах от 1779 до 3614 м над ур. моря. Как видно, к специфичному фактору процесса формирования стока Нарына относится летний максимум осадков, что обуславливает выбор годового интервала времени для суммирования осадков как стокообразующего фактора. Другим фактором, влияющим на образование стока Нарына, принята средняя температура воздуха за май–сентябрь. Существенный вклад в сток Нарына, особенно летом и в годы с дефицитом осадков, вносит поступление талой воды из области оледенения. По расчётам А.Н. Кренке [7], средний многолетний объём стока в бассейне Нарына с площади оледенения 1370 км^2 равен примерно $1,0 \text{ км}^3$, что на замыкающем гидростворе Учтерек составляет 8,4% годового стока и 22% стока за период абляции. Для дальнейшего анализа особенности стока Нарына важно также, что по мере увеличения сдвига назад по времени связь стока текущего года с предшествующими меняется от крайне

слабой (коэффициент корреляции от 0,14 до 0,23) до почти полного её отсутствия.

Дендрохронологическая информация

С 2000 по 2009 г. на территории Киргизии с целью хронологического датирования ширины и плотности древесных колец были отобраны [11, 12] керны и спилы ели Шренка (*Picea Schrenkiana*). Отбор образцов и их обработка проводились по стандартной методике, принятой в дендроклиматологии [10, 13]. Всего отобрано примерно 800 образцов, из них около 600 на верхней границе леса (15 дендроплощадок в интервале высоты 2650–3200 м над ур. моря) и приблизительно 150 на нижней границе леса (9 дендроплощадок на высотах 2050–2400 м). Кроме того, на трёх дендроплощадках в средней части лесного пояса (2350–2650 м) было отобрано около 60 кернов. Датирование и индексирование образцов, выполненное в Институте географии РАН, позволило получить [11, 12] для ширины W годичных колец ели ряд локальных хронологий. В том числе: 18 – на верхней границе леса; 9 – на нижней границе леса; 2 – для средней части леса; 3 – для верхней границы леса по данным измерений максимальной плотности годичных колец. Максимальный

Таблица 1. Характеристики сводных хронологий годовых древесных колец

Параметры	Ширина колец на нижней границе леса W_l	Максимальная плотность на верхней границе леса $D_{\max}$	Ширина колец на верхней границе леса W_{up}
Число датированных серий N	161	80	533
Общая длина ряда L	326 лет (1680–2005 гг.)	370 лет (1626–1995 гг.)	708 лет (1301–2008 гг.)
Число датированных колец m	14 608	18 159	98 051
EPS > 0,85, годы	1740–2005	1680–1995	1360–2008
Средняя чувствительность K_s	0,321	0,083	0,229

интервал локальной хронологии W относится к 1301–2005 гг., минимальный – к 1917–2005 гг.

Кроме 32 локальных, составлены две сводные хронологии ширины годовых колец ели: для верхней границы леса W_{up} с 1360 по 2008 г. – 458 кернов; для нижней границы леса W_l с 1741 по 2005 г. – 142 керна. Сводная хронология по максимальной плотности $D_{\max}$ древесных колец для верхней границы леса имеет продолжительность с 1626 по 1995 г. и состоит из 80 кернов. Характеристики сводных хронологий, включая определение достоверности (EPS-тест) и коэффициента средней чувствительности K_s [10], приведены в табл. 1. Временной ряд ширины/плотности колец считается чувствительным, если $K_s > 0,3$, и достоверным при EPS > 0,85 [34].

Кроме ширины годовых колец, мы использовали индексированные значения максимальной плотности, измеренной Ф. Швейнгрубером в долинах Карабаткак, Сарыкунгей и Сарыймек (соответственно площадки KAR, SK, SJ) [21]. Высокая взаимная корреляция ($r = 0,70 \div 0,75$) хронологий KAR, SK, SJ позволяет объединить их и получить для верхней границы леса на Центральном Тянь-Шане сводную хронологию по максимальной плотности $D_{\max}$ продолжительностью с 1626 по 1995 г., состоящую из 58 кернов, и достоверную с 1650 по 1995 г. Сопоставление сводной хронологии с аналогичными хронологиями Ю. Юаня и др. [35] для верхней границы леса на Восточном Тянь-Шане показало их явное сходство ($r = 0,81$). В большинстве своём годы с наименьшей и наибольшей максимальной плотностью на Восточном и Центральном Тянь-Шане совпадают.

Сравнение хронологий

Большинство пиков хронологий W_{up} и W_l совпадают. Они имеют между собой корреляцию 0,46. Наблюдаемый для хронологии W_l больший размах колебаний, чем для W_{up} , связан с повышенной чувствительностью этой хронологии к климатическим изменениям; то же отмечали и китайские исследователи [31]. Почти все хронологии с нижней границы леса значимо коррелируют со сводной хронологией W_{up} ($r = 0,4 \div 0,5$). Хронологии плотности

годовых колец имеют заметно меньшую амплитуду колебаний, чем хронологии ширины колец. Этот эффект отмечался для максимальной плотности и другими исследователями, например [2]. Для определения общих спектральных свойств сводных хронологий и анализа изменения их спектральных характеристик во времени было применено непрерывное вейвлет-преобразование [28] с базисным вейвлетом Морле. В сводной хронологии для нижней границы леса W_l никакой цикличности не установлено; в сводной хронологии W_{up} отмечена квазисорокалетняя периодичность, затухающая в конце XVI – начале XVII в. и на протяжении XIX в.; в сводной хронологии $D_{\max}$ наблюдается квазидвадцатидвухлетняя периодичность в XIX и XX вв.

Годичные кольца деревьев и климат

Образование годичного кольца ели Шренка на Тянь-Шане начинается в апреле–мае. Ранняя древесина, светлая и более рыхлая, составляет основную часть годичного кольца. В середине лета – начале осени начинает формироваться поздняя древесина, ширина которой, как правило, не превышает пятой части кольца. Для оценки влияния метеоусловий на ширину и плотность годовых колец ели на Тянь-Шане в 1961–1990 гг. использованы аномалии годовых и сезонных значений температуры воздуха и осадков. Аномалии температуры воздуха и осадков рассчитаны по данным метеостанций [33], расположенных в бассейне Нарына и на сопредельной территории на высотах от 763 до 3614 м над ур. моря (рис. 2). Преобразование всех переменных к формату аномалий позволило устранить влияние высоты местности и получить решение задачи на уровне однородных полей. Результаты корреляционного анализа рассматриваемых характеристик, приведённые в табл. 2, позволили сформулировать следующие выводы.

1. Одно из свойств ширины годовых колец ели в целом для лесного пояса и его средней и нижней частей – низкие значения как коэффициентов прямой корреляции с осадками, так и коэффициентов обратной корреляции с температурой воздуха. Знак корреляции соответствует известным

Таблица 2. Коэффициенты корреляции аномалий в 1961–1990 гг.*

Аномалии	W_{uml}	W_{up}	W_{ml}	D_{max}
Средний годовой сток $Q_{год}$ по гидропостам:				
Учтерек	0,507	0,587	0,245	–0,006
Кекирим	0,609	0,660	0,350	–0,035
г. Нарын	0,458	0,488	0,263	0,188
Средняя температура воздуха T :				
июнь–сентябрь	–0,189	0,026	–0,361	0,720
июль–август	–0,176	0,003	–0,315	0,785
Сумма осадков P :				
январь–декабрь	0,154	0,058	0,194	–0,281
июнь–сентябрь	0,232	0,052	0,333	–0,524
Ширина годовых колец ели:				
все дендроплощадки в верхней, средней и нижней частях лесного пояса W_{uml}	1,000	0,862	0,835	0,044
дендроплощадки в верхней части лесного пояса W_{up}	0,862	1,000	0,441	0,173
дендроплощадки в средней и нижней частях лесного пояса W_{ml}	0,835	0,441	1,000	–0,110
Максимальная плотность годовых колец ели D_{max}	0,044	0,173	–0,110	1,000

*Жирным шрифтом выделены коэффициенты корреляции, значимые с вероятностью от 0,75 до 0,95.



Рис. 2. Пункты дендрохронологических и гидрометеорологических измерений:

1 – дендроплощадки в верхней и средней частях леса; 2 – дендроплощадки в нижней части леса; 3 – гидропосты на р. Нарын; 4 – метеостанции в бассейне Нарына и соседних рек

Fig. 2. Sites of dendrochronological and hydrometeorological measurements:

1 – tree ring sites in the upper and middle parts of the forest; 2 – tree ring sites in the bottom of the timber zone; 3 – gauges on the Naryn river; 4 – weather stations in the basin of the Naryn river and in the neighboring area

закономерностям влияния факторов тепла и влаги на прирост древесины.

2. Наиболее достоверны по величине и знаку коэффициенты корреляции максимальной плотности годовых колец ели с сезонными значениями температуры воздуха и осадков. Подобная реакция максимальной плотности на температуру летнего периода характерна для Северной Америки [19],

Сибири [15, 24] и Европы [16]. Следовательно, для бассейна Нарына практическое значение имеет исследование зависимостей $D_{max} = f(T_{vi-viii})$ и $D_{max} = f(T_{vi-viii}, P_{vi-ix})$, где $T_{vi-viii}$ – средняя летняя температура воздуха, P_{vi-ix} – сумма осадков за июнь–сентябрь.

3. Хронология D_{max} не коррелирует с хронологиями ширины годовых колец на верхней и

нижней границах леса, не совпадают и их экстремумы. Это объясняется тем, что максимум распределения плотности по ширине годичного кольца приурочен к поздней древесине, когда основными факторами её прироста становятся летне-осенние условия климата [13]. Минимальная и средняя плотность годичного кольца характерна для ранней древесины, образованной, в том числе, и под влиянием климатических условий предыдущего года. Таким образом, у ели Шренка вблизи верхней границы леса на Тянь-Шане ширина древесного кольца и его максимальная плотность по-разному реагируют на условия внешней среды, что необходимо учитывать в гидрологических и климатических реконструкциях.

4. Корреляционный анализ показывает сходство между хронологиями всех дендроплощадок, расположенных в разных районах лесного пояса Тянь-Шаня. Следовательно, эти хронологии отражают влияние общих климатических факторов регионального уровня. Сходство хронологий, построенных для верхней и нижней границ леса на Тянь-Шане, отмечалось и другими исследователями [20, 31].

Как установила Н.М. Борщева [1], важная особенность формирования ширины годичных колец ели Шренка – существенное влияние температуры воздуха и осадков предыдущего вегетационного периода на прирост ранней древесины в текущем году. Это свойство снижает потенциал использования дендрохронологических данных для реконструкции годового стока Нарына (см. табл. 2), который формируется в условиях увлажнения и температурного режима текущего года.

Методика реконструкции стока

Научной основой реконструкции временных колебаний речного стока с помощью дендрохронологических данных служит известное положение А.И. Воейкова о реках как о продукте климата [3]. Применительно к конкретному речному бассейну это положение нуждается в количественном наполнении и осмыслении. Достаточно просто вопрос описания колебаний стока Q как элемента водного баланса водосбора решается с помощью измерений на замыкающем гидростворе. Очевидно, что в рамках уравнения годового водного баланса (1) разность осадков P и эвапотранспирации ET в качестве характеристики климата должна быть проинтегрирована по площади водосбора и выражена в единицах объема:

$$Q = K_R(P - ET) \pm \Delta W, \quad (1)$$

где K_R – коэффициент трансформации поступления влаги на поверхность бассейна; ΔW – динамические запасы воды в бассейне.

Для численного описания и расчёта полей осадков, температуры воздуха и других влияющих факторов, особенно в горах, используются данные по ограниченному числу пунктов измерений. Репрезентативность этих пунктов относительно соответствующих полей климатических факторов априорно неизвестна и устанавливается только эмпирически, если в результате поиска и отбора исходных данных получено и проверено эмпирическое уравнение связи стока с влияющими факторами. Процедура выбора влияющих факторов предусматривает также оценку их значимости (в долях единицы) в описании дисперсии зависимой переменной (стока) в рамках модели множественной регрессии. Полную сумму нормированных аномалий влияющих факторов или её часть (P, T, h, C) далее будем рассматривать как гидроклиматический индекс HK условий формирования стока или сводный аналог приходной части уравнения водного баланса:

$$HK = I_P - I_T - I_C + I_h, \quad (2)$$

где $I_P = (P_i - \bar{P})/\bar{P}$, $I_T = (T_i - \bar{T})/\bar{T}$, $I_C = (C_i - \bar{C})/\bar{C}$, $I_h = (h_i - \bar{h})/\bar{h}$; P – осадки; T – температура воздуха; C – общая облачность; h – упругость водяного пара в воздухе; I_P, I_T, I_C, I_h – соответственно нормированные аномалии P, T, C, h ; горизонтальная черта над переменными означает осреднение за характерные интервалы времени; i – символ идентификации года.

Таким образом, вместо генетической формулировки А.И. Воейкова используется одномерное эмпирическое уравнение: сток есть функция индекса климата, т.е. $Q(t) = f(HK)$. Коэффициент детерминации этого уравнения зависит от полноты доступного набора климатических факторов стока и репрезентативности реальной сети относительно идеального варианта расположения пунктов измерений. Существование связи ширины годичных колец деревьев с гидроклиматическим индексом $W = f(HK)$ служит обоснованием использования временного ряда W для реконструкции стока. Конкретный набор хронологий, успешно описывающих дисперсию $Q(t)$, устанавливается в результате получения и верификации эффективного уравнения множественной линейной регрессии.

Гидроклиматический индекс стока р. Нарын

Для поиска и анализа информативных составляющих гидроклиматического индекса HK стока р. Нарын за 1961–1990 гг. использованы опубликованные справочные данные Гидрометеослужбы: 1) годовые объёмы стока реки Q на гидропостах Учкурбан, Кекирим и г. Нарын; 2) суммы осадков P на 23 метеостанциях; 3) сезонные величины – температуры воздуха T (37 метеостанций), баллов

Таблица 3. Связи между годовым стоком р. Нарын и влияющими факторами*

Индекс	Гидропосты		
	Учтерек	Кекирим	г. Нарын
<i>Функция $Q = f(X_1 \div X_4)$, обучающая выборка 1961–1990 гг.</i>			
R	0,92	0,87	0,85
δR	0,03	0,05	0,05
$Crit$	0,38	0,48	0,53
X_1	$T(5-9)$	$T(5-9)$	$T(5-9)$
α_1	0,14	0,26	0,02
X_2	$P(1-12)$	$P(1-12)$	$P_1(1-12)$
α_2	0,53	0,45	0,60
X_3	$C(6-9)$	$C(6-9)$	$P_2(1-12)$
α_3	0,04	0,19	0,27
X_4	$h(6-9)$	$h(6-9)$	$C(6-9)$
α_4	0,29	0,10	0,11
<i>Функция $Q = f(HK)$, данные метеостанций</i>			
R	0,80	0,82	0,67
<i>Функция $Q = f(HK)$, данные [20]</i>			
R	0,70÷0,75	0,70÷0,74	0,50÷0,67
<i>Функция $HK = f(W_1 \div W_4)$</i>			
R	0,82	0,65	0,73
<i>Функция $Q = f(W_1 \div W_4)$</i>			
R	0,74	0,75	0,67
$Crit$	0,68	0,66	0,75
<i>Функция $V = f(W_1 \div W_4)$, обучающая выборка 1973–2005 гг., контрольная – 1940–1972 гг.</i>			
R	0,72	0,80	0,75
δR	0,06	0,04	0,06
$Crit$	0,69	0,60	0,66
$\Delta c, \%$	12,2	9,2	11,4
$\Delta v, \%$	15,0	14,5	28,0
X_1	ENG	ENG	KOE
α_1	0,28	0,16	0,17
X_2	KOE	KOE	KOK
α_2	0,09	0,02	0,20
X_3	ALacom	KOK	NAN 1
α_3	0,61	0,13	0,02
X_4	KUNw	ALacom	ALacom
α_4	0,02	0,69	0,61

* Q – средний годовой расход; R – сводный коэффициент корреляции уравнения регрессии 4-го порядка; δR – ошибка определения R ; $Crit$ – критерий качества уравнения; $X_1 \div X_4$ – названия независимых переменных, в скобках – продолжительность осреднения/суммирования переменных (номера месяцев года); $\alpha_1 \div \alpha_4$ – вклады переменных $X_1 \div X_4$ в описание дисперсии функции; W – ширина годичных колец ели; V – годовой объём стока; Δc и Δv – соответственно относительная ошибка расчёта V в обучающей и контрольной выборках, %.

общей облачности C (10 метеостанций), упругости водяного пара h в воздухе (7 метеостанций). Схема расположения пунктов гидрометеонаблюдений в бассейне Нарына и на сопредельной территории

приведена на рис. 2. Для определения состава HK использовалась компьютерная программа многофакторного регрессионного анализа [6]. В результате численных экспериментов установлено, что наи-

высший коэффициент корреляции уравнений линейной регрессии четвёртого порядка

$$Q = f(k_P, k_T, k_C, k_h, P, T, C, h) \quad (3)$$

(k_P, k_T, k_C, k_h – эмпирические коэффициенты) получен для следующих аргументов: годовая сумма осадков $P(1-12)$; средняя температура воздуха за май–сентябрь $T(5-9)$; осреднённые за июнь–сентябрь балл общей облачности $C(6-9)$ и упругость водяного пара $h(6-9)$ в воздухе.

В табл. 3 приведены коэффициенты корреляции между годовым стоком Нарына на гидропостях Учтерек, Кекирим и г. Нарын и гидроклиматическим индексом HK . Для оценки HK в бассейне Нарына использованы также данные P, T, C, h из 16 узлов климатического архива CRU TS 3.1 в пределах $40,5-42,2^\circ$ с.ш., $70,7-78,6^\circ$ в.д. и $2000-3000$ м над ур. моря [22]. Как видно, тесноту связей $Q(t) = f(HK)$ за 1961–1990 гг. можно считать вполне приемлемой для последующего совершенствования обсуждаемого метода.

Реконструкция многолетних колебаний годового стока по дендрохронологическим данным заключается в замене правой части уравнения (1) сведениями о ширине/плотности годовых колец деревьев. Обоснованность этой замены без дополнительного анализа далеко не очевидна, поскольку на ширину и плотность древесных колец влияет не только климат, но и эколого-физиологические факторы, не имеющие прямого отношения к стоку. Для упрощённого решения обсуждаемой задачи гидроклиматический индекс использован в качестве связующего звена между речным стоком, климатом и дендрохронологическими данными D . Обобщённый символ D означает, что в исследование будут включены ширина W и максимальная плотность древесных колец $D_{\max}$. Далее мы конкретизируем использование какой-либо из этих переменных. Априорно взаимосвязь между Q, HK и D сформулирована в виде следующего постулата: если каждая из двух переменных (Q, D) коррелирует с третьей (HK), то переменные Q и D также могут быть связаны между собой. Коэффициенты корреляции для зависимостей $Q = f(HK)$ и $HK = f(W_1 \div W_4)$, которые подтверждают выполнение данного положения в бассейне Нарына, даны в табл. 3; $W_1 \div W_4$ – хронологии ширины годовых колец на дендроплощадках, выбранные в уравнения линейной регрессии 4-го порядка.

Численные оценки параметров (см. табл. 3) и качества уравнений $Q = f(W_1 \div W_4)$ приводят к выводу, что одних данных о ширине и плотности древесных колец явно недостаточно для полноценной реконструкции стока. Кроме того, лимитирующее воздействие на тесноту связей $Q = f(W_1 \div W_4)$ оказывают эколого-климатические особенности

формирования годовых колец ели. В связи с этим необходимо привлечение дополнительных аргументов (помимо дендрохронологических данных) в уравнения для расчёта стока. Эта задача рассмотрена в следующем разделе работы.

Реконструкции стока Нарына и верификация результатов

Кандидатами на роль дополнительного аргумента X в уравнение $Q = f(D, X)$ рассмотрены: $PDSI$ (Palmer Drought Severity Index) – индекс засушливости или сухости, предложенный Палмером [26] и описанный в [29, 30], а также индекс баланса осадков и эвапотранспирации – $SPEI$ (Standardized Precipitation Evapotranspiration Index). Индекс $SPEI$ представляет собой разность осадков и потенциальной эвапотранспирации. Для пользователей $SPEI$ подготовлен [30] глобальный архив [23] значений этого индекса за 1901–2006 гг. с шагом $0,5^\circ$ по географическим координатам.

Численная оценка эффективности совместного использования климатических индексов $PDSI$ или $SPEI$ и дендрохронологических данных $W, D_{\max}$ на 25 площадках с целью получения уравнений множественной линейной регрессии $V = f(W, D_{\max}, PDSI)$ и $V = f(W, D_{\max}, SPEI)$ выполнена для годового объёма стока V на трёх гидропостах в бассейне Нарына: Учтерек, Кекирим и г. Нарын. Временной интервал 1973–2005 гг. использован как обучающая часть выборки, а 1940–1972 гг. – как контрольная. Месячные значения индексов $PDSI$ и $SPEI$ в узлах регулярной сетки, относящихся к бассейну Нарына (соответственно 7 и 20 узлов), выбраны из глобальных баз данных для каждого индекса и осреднены за период с мая по сентябрь. Максимальное число эффективных аргументов, включаемых в уравнения регрессии, принято равным четырём. Параметры уравнений регрессии $V = f(W, PDSI)$ и $V = f(W, SPEI)$ 4-го порядка с наивысшим сводным коэффициентом корреляции, полученные методом полного перебора сочетаний независимых переменных, приведены в табл. 4. Сравнение параметров регрессии и оценок качества расчёта стока на трёх гидропостах служит основанием для следующих выводов:

1) сводные коэффициенты корреляции уравнений $V = f(W, PDSI)$ и $V = f(W, SPEI)$ существенно выше аналогичных показателей для уравнений, где аргументами служили только данные дендроплощадок (см. табл. 3);

2) суммарный вклад дендрохронологических данных в описание дисперсии зависимых переменных (объёмы стока на трёх гидропостях) больше по сравнению со вкладами индексов $PDSI$ и $SPEI$;

3) вклад и соответственно информативность индекса $PDSI$ в уравнениях 4-го порядка и его про-

Таблица 4. Параметры уравнений регрессии $V = f(W, PDSI)$ и $V = f(W, SPEI)^*$

Индекс	Гидропосты		
	Учтерек	Кекирим	г. Нарын
<i>Функция $V = f(W, PDSI)$</i>			
R	0,94	0,91	0,85
δR	0,01	0,02	0,03
$Crit$	0,33	0,42	0,52
$\Delta c, \%$	6,2	5,7	8,6
$\Delta v, \%$	19,0	16,9	19,8
X_1	$W(ALA)$	$W(ALA)$	$W(ALA)$
α_1	0,25	0,34	0,22
X_2	$W(ENG)$	$W(KOK)$	$W(KOK)$
α_2	0,20	0,38	0,45
X_3	$PDSI(3)$	$PDSI(1)$	$PDSI(6)$
α_3	0,47	0,06	0,20
X_4	$PDSI(7)$	$PDSI(6)$	$PDSI(7)$
α_4	0,08	0,22	0,13
$\Sigma\alpha(W)$	0,45	0,72	0,67
$\Sigma\alpha(PDSI)$	0,55	0,28	0,33
<i>Функция $V = f(W, SPEI)$</i>			
R	0,81	0,87	0,81
δR	0,04	0,03	0,04
$Crit$	0,59	0,50	0,59
$\Delta c, \%$	10,3	7,0	9,3
$\Delta v, \%$	17,4	17,3	21,8
X_1	$W(ALA)$	$W(ALA)$	$W(ALA)$
α_1	0,26	0,35	0,46
X	$W(KOK)$	$W(KOK)$	$W(KOE)$
α_2	0,43	0,48	0,19
X_3	$W(CKSE)$	$W(CKSE)$	$W(KOK)$
α_3	0,18	0,05	0,24
X_4	$SPEI(1)$	$SPEI(7)$	$SPEI(3)$
α_4	0,13	0,12	0,11
$\Sigma\alpha(W)$	0,87	0,83	0,89
$\Sigma\alpha(SPEI)$	0,13	0,17	0,11

* $X_1 \div X_4$ – тип и названия независимых переменных (в скобках)/номера узлов регулярной сетки в соответствующих базах данных; $\Sigma\alpha(W)$ сумма вкладов ширины годичных колец деревьев в описание дисперсии функции; $\Sigma\alpha(PDSI)$ и $\Sigma\alpha(SPEI)$ – то же, для индексов $PDSI$ и $SPEI$; остальные обозначения см. табл. 3.

странственное изменение гораздо более значимы по сравнению с индексом $SPEI$.

Таким образом, эмпирические формулы $V = f(W, PDSI)$ и $V = f(W, SPEI)$ вполне пригодны для оценки годового стока Нарына за 1901–2006 гг. Рассчитать V за пределами этого интервала времени пока невозможно из-за отсутствия исходной инфор-

мации по месячным значениям индексов $PDSI$ и $SPEI$. Предпринята также попытка реконструкции годовых объёмов стока в 1700–2005 гг. для гидропоста Учтерек по восьми хронологиям (ATB, ENG, ENGur, KOE, KOK, NAN 1, ALAcom, KUNw) за соответственный стоку интервал времени. В обучающую часть выборки вошли годы с 1957 по 2005, а в контрольную – с 1910 по 1956. Сводный коэффициент корреляции уравнения $V = f(W_1 \div W_4)$ 4-го порядка оказался равным 0,66, а модуль относительной ошибки расчёта V соответственно в обучающей и контрольной выборках – 12,7 и 18,3%, что несколько хуже, чем в табл. 3 из-за других размеров выборки.

Ещё более продолжительная реконструкция годового стока Нарына (1450–2005 гг.) получена с помощью хронологий ENG, KOE, ALAcom и средних за лето значений индекса сухости $PDSI-2$, рассчитанных по методу, приведённому в исследовании [18], и доступных за 1300–2005 гг. для Юго-Восточной Азии [17]. В обучающую часть выборки вошли годы с 1957 по 2005, а в контрольную – с 1910 по 1956. Сводный коэффициент корреляции уравнения $V = f(W, PDSI-2)$ 3-го порядка равен 0,70, а модуль относительной ошибки расчёта V соответственно в обучающей и контрольной выборках – 12,2 и 17,4%. Вклады $PDSI-2$ и дендрохронологических данных в описание дисперсии стока составляют соответственно 0,051 и 0,949. Разница между коэффициентами корреляции уравнений регрессии 3-го и 4-го порядков незначима.

Причина недостаточно тесной связи $V = f(W_1 \div W_4)$ и $V = f(W, PDSI)$ (см. табл. 3) либо увеличения относительной ошибки расчёта годового стока по уравнениям $V = f(W, PDSI)$ и $V = f(W, SPEI)$ за пределами обучающей выборки (см. табл. 4) заключается, вероятно, в неучёте временного тренда коэффициентов уравнений множественной регрессии $V = f(W_1 \div W_4)$ и $V = f(W, PDSI)$. Устранить данный недостаток можно, если использовать эти уравнения с коэффициентами, изменяющимися во времени. Эффективность такого решения иллюстрирует рис. 3, на котором приведены совмещённые графики временных колебаний годового объёма стока Нарына в 1910–2005 гг., измеренного на гидропосте Учтерек и рассчитанного по уравнениям $V = f(W_1 \div W_4)$ и $V = f(W, PDSI)$ с постоянными и переменными коэффициентами. Кроме того, в табл. 5 дан ряд статистических параметров, характеризующих качество расчёта годового стока Нарына по различным эмпирическим формулам. Эти данные однозначно указывают на преимущества использования уравнения $V = f(W, PDSI)$ с переменными коэффициентами. Коэффици-

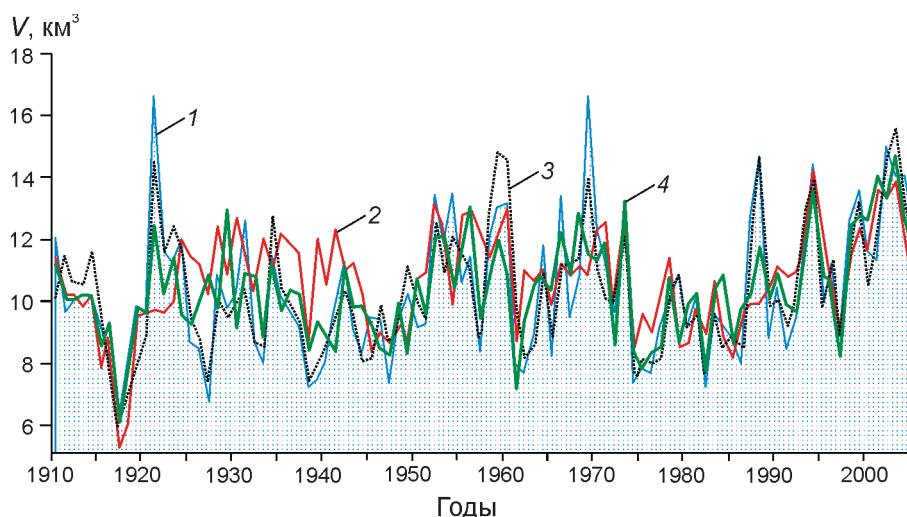


Рис. 3. Совмещённые графики временных колебаний годового стока р. Нарын (гидропост Учтерек):

1 – по данным измерений V_{fact} ; 2 – расчёт по формуле $V = f(W_1 \div W_4)$ с постоянными параметрами в течение 1700–2005 гг. V_{calc1} ; 3 – расчёт по формуле $V = f(W_1 \div W_4)$ с переменными параметрами в течение 1910–2005 гг. V_{calc2} ; 4 – расчёт по формуле $V = f(W, PDSI)$ с переменными параметрами в течение 1910–2005 гг. V_{calc4}

Fig. 3. Combined graphs of temporary fluctuations of the annual runoff of Naryn river (gauge Uchterek).

1 – V_{fact} is according to the measurements; 2 – V_{calc1} is calculation by the formula $V = f(W_1 \div W_4)$ with constant parameters during 1700–2005; 3 – V_{calc2} is calculation by the formula $V = f(W_1 \div W_4)$ with variable parameters during 1910–2005; 4 – V_{calc4} is calculation by the formula $V = f(W, PDSI)$ with variable parameters during 1910–2005

Таблица 5. Варианты определения годового стока р. Нарын (гидропост Учтерек), 1910–2005 гг.*

Параметры	Варианты				
	V_{fact}	V_{calc1}	V_{calc2}	V_{calc3}	V_{calc4}
Среднее значение	10,36	10,70	10,38	11,01	10,36
Среднеквадратичное отклонение	2,19	1,59	1,62	2,37	1,98
Коэффициент вариации C_v	0,21	0,15	0,16	0,22	0,19
Модуль относительной ошибки расчёта $abs(dV)$, %	—	15,00	11,30	12,92	6,96
Вероятность сходства дисперсий F_{test}	—	0,002	0,004	0,4364	0,325
Корреляция Пирсона	—	0,521	0,728	0,783	0,908
Вероятность незначимости различия средних T_{test}	—	0,222	0,941	0,050	1,000

* V_{fact} – данные измерений; V_{calc1} – формула $V = f(W_1 \div W_4)$ с постоянными параметрами в течение 1700–2005 гг.; V_{calc2} – та же формула с переменными параметрами в течение 1910–2005 гг.; V_{calc3} – формула $V = f(W, PDSI)$ с постоянными параметрами в течение 1910–2005 гг.; V_{calc4} – та же формула с переменными параметрами в течение 1910–2005 гг.

ент детерминации связи между фактическим и вычисленным годовым стоком Нарына по уравнению $V_{calc} = f(W, PDSI)$ с коэффициентами, изменяющимися во времени, равен 0,82.

Годичные кольца деревьев и ледниковый сток

В качестве характеристики ледникового стока приняты: объём суммарного таяния сезонного снега, льда и старого фирна V_m и объём таяния льда и старого фирна W_{gl} . Оба объёма рассчитаны за июнь–сентябрь 1939–1988 гг. по модели РЕГМОД [5] для 40 групп ледников общей площадью 947 км² в бассейнах Большого и Малого

Нарына. Значения коэффициента корреляции r и критерия качества $crit$ для уравнений $V_m = f(W)$, $W_{gl} = f(W)$ и $V_m = f(W, PDSI)$ и $W_{gl} = f(W, PDSI)$ даны в табл. 6. Эти результаты считаем удовлетворительными и пригодными для дальнейшего исследования поставленной задачи.

Прогноз стока р. Нарын и максимальной плотности годичных колец ели

Вполне приемлемые результаты прогноза годового стока Нарына для гидропостов Учтерек и Кекирим получены с помощью компьютерной программы и метода «Гусеница» [4].

Таблица 6. Параметры уравнений для расчёта составляющих ледникового стока Нарына

Функция	Параметры		Названия аргументов (в скобках даны их вклады в описание дисперсии функций, %)			
	r	$crit$				
$V_m = f(W)$	0,78	0,63	CKSU (50);	ENG (22);	NAR (23);	KUNw (5)
$W_{gl} = f(W, D_{max})$	0,72	0,70	ALA (48);	KOE (33);	KAR D_{max} (18);	ATA (1)
$V_m = f(W, PDSI)$	0,80	0,59	ALA (31);	CKSU (36);	CHI (15);	$PDSI$ 4 (18)
$W_{gl} = f(W, PDSI)$	0,73	0,69	KOE (48);	ATA (1);	$PDSI$ 4 (11);	$PDSI$ 7 (40)

Основой метода служит преобразование одномерного временного ряда в многомерный путём извлечения M одинаковых частей, начиная с первого элемента одномерного ряда и далее со сдвигом в один год от начала предыдущей части. Размер части или длина «гусеницы» служит входным параметром в программе. Полученная M -мерная матрица используется в стандартной процедуре расчёта главных компонент, собственных чисел и собственных векторов. Варьируя число этих трёх параметров, можно восстановить исходный одномерный ряд с различной степенью приближения и получить линейную рекуррентную формулу для описания изменчивости ряда и его прогноза на заданное число шагов по времени.

В нашем случае эффективным оказался следующий подход: а) в ряде стока на гидропосте Учтерек последние 10 значений не использовались в программе «Гусеница», так как по ним оценивалось качество прогнозов; б) прогноз выполнялся на год вперёд по времени; в) в следующем прогнозе длина входного ряда увеличивалась на последнее по времени измеренное значение стока. Допустимым верхним пределом разности между рассчитанным и измеренным стоком принят стандартный критерий $0,674\sigma$ (σ — среднеквадратичное отклонение входного ряда). В результате экспериментов получена удовлетворительная оправдываемость прогнозов стока для гидропоста Учтерек, равная 70%. Аналогичные расчёты по программе «Гусеница» для гидропоста Кекирим дали оправдываемость прогнозов годового стока 85,5%. Отметим, что, как и для других статистических методов, качество и устойчивость результатов существенно зависят от состава и длины обучающей выборки.

При анализе связи хронологий максимальной плотности годовых колец ели с температурой воздуха и осадками (см. табл. 2) установлена тесная зависимость $D_{max} = f(Tvi-viii)$ как на отдельных дендроплощадках, так и для средней величины D_{max} . Наиболее информативной оказалась хронология $SJ D_{max}$ с длиной ряда 1626–1995 гг. В гляциологических расчётах и исследованиях систематически используется средняя за лето

температура воздуха. В рамках рассматриваемой в работе проблемы необходимо решить две самостоятельные задачи: оценить параметры зависимости $SJ D_{max} = f(Tvi-viii)$ и прогноз многолетнего ряда $SJ D_{max}$.

Для решения первой задачи за 1961–1990 гг. использованы величины $SJ D_{max}$ и $Tvi-viii$ на 16 метеостанциях Центральной Азии [33], расположенных в интервале высоты 477–4169 м над ур. моря и географических координат $68,38^\circ$ – $78,40^\circ$ в.д. и $38,83^\circ$ – $42,70^\circ$ с.ш. В этом наборе данных коэффициент корреляции $SJ D_{max} = f(Tvi-viii)$ в девяти случаях оказался более 0,70, а в трёх случаях — выше 0,80. Эксперименты для решения второй задачи выполнены по программе «Гусеница». Одна часть ряда (1626–1980 гг.) использована как обучающая выборка, а по другой (1981–1995 гг.) проведена оценка качества прогнозирования. Величина параметра M принята равной 72 годам, число главных компонент варьировало от 7 до 15. Прогноз $SJ D_{max}$, в отличие от предсказания стока (первая задача), выполнялся на 15 лет вперёд. Наилучшая оценка качества прогноза получена при десяти главных компонентах, описывающих 41,9% дисперсии ряда. Для этого варианта прогноза средний модуль относительной разности между фактическим и рассчитанным значениями составил вполне приемлемую величину — 5,1%. Таким образом, установлены возможности продления вперёд по времени ряда $SJ D_{max}$ с целью расчёта средней летней температуры в бассейнах рек Центральной Азии и использования значений $Tvi-viii$ как в ретроспективе, так и в прогнозных гляциологических моделях и расчётах.

Выводы

1. Для трёх основных гидропостов (Учтерек, Кекирим и г. Нарын) в бассейне р. Нарын создана реконструкция объёма годового стока и оценено её качество. Показано, что наилучшие результаты реконструкции стока обеспечивает уравнение $V = f(W, PDSI)$ с коэффициентами, изменяющимися во времени.

2. На основе полученных дендрохронологических данных и индекса сухости *PDSI-2* [17, 18] создана реконструкция межгодовой и внутривековой изменчивости объёма годового стока р. Нарын с 1450 по 2005 г. Наиболее значительные колебания стока в течение этого интервала времени выявлены с 1450 по 1665 г. Экстремумы модульного коэффициента $M_i = V_i/V_{mean}$ годового стока р. Нарын (гидропост Учтерек) за 1450–2005 гг. отмечены в следующие годы: $M_{1459} = 0,5613$; $M_{1497} = 0,5099$; $M_{1512} = 1,4749$; $M_{1593} = 1,4788$; $M_{1917} = 0,4503$; $M_{1994} = 1,4173$.

3. Хронологии ширины и плотности годовых колец ели Шренка в бассейне Нарына оказались достаточно информативными для расчёта составляющих ледникового стока в этом бассейне. Как и в случае расчёта годового стока Нарына, существенный вклад в описание дисперсии зависимой переменной (сток) вносит индекс сухости *PDSI*.

4. Проведены численные эксперименты по прогнозу различными методами годового стока Нарына и максимальной плотности годовых колец ели Шренка. Результаты, пригодные для использования в гидрологических и гляциологических расчётах, получены с помощью метода и программы «Гусеница» [4].

Литература

- Борщева Н.М. Изучение степени воздействия лимитирующих факторов на радиальный прирост ели Шренка // Экологические исследования биоты экосистем северной Киргизии. Тянь-Шанская высокогорная физико-географическая станция. Фрунзе: ИЛИМ, 1988. С. 15–22.
- Ваганов Е.А., Шашкин А.В. Рост и структура годовых колец хвойных. Новосибирск: Наука, 2000. 230 с.
- Воейков А.И. Климаты Земного шара и в особенности России: Избр. соч. Т. 1. М.—Л.: Изд. АН СССР, 1948. 750 с.
- Голяндина Н.Э. Метод «Гусеница»-SSA: прогноз временных рядов. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2004. 52 с.
- Коновалов В.Г. Таяние и сток с ледников в бассейнах рек Средней Азии. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 236 с.
- Коновалов В.Г., Мацковский В.В. Регионализация и регрессионный анализ температуры воздуха и осадков в глобальной БД по климату // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 3. С. 283–289.
- Кренке А.Н. Массобмен в ледниковых системах на территории СССР. Л.: Гидрометеиздат, 1982. 287 с.
- Мацковский В.В., Долгова Е.А., Соломина О.Н. Применение дендрохронологических данных для реконструкции стока реки Теберды за 1850–2005 гг. // Лёд и Снег. 2011. № 1 (113). С. 119–123.
- Овчинников Д.В. Реконструкция изменений климата гор Алтая дендрохронологическими методами: Дис. на соиск. уч. степ. канд. геогр. наук. Красноярск: Красноярский государственный университет, 2002. 132 с.
- Тишин Д.В. Дендрэкология (методика древесно-кольцевого анализа). Казань: изд. Института экологии и географии, 2011. 33 с.
- Соломина О.Н., Абылмеизова Б., Грязнова В.В., Еришова И.В. Реконструкция гидротермического коэффициента в 1680–2005 гг. по дендрохронологическим данным в Прииссыккулье, Тянь-Шань, Республика Кыргызстан // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. 2007. Т. 21. С. 183–202.
- Соломина О.Н., Максимова О.Е. Дендрохронологические исследования на Тянь-Шане как источник климатической информации // Изв. РАН. Сер. геогр. 2010. № 6. С. 54–66.
- Шиятов С.Г., Ваганов Е.А., Кирдянов А.В., Круглов В.Б., Мазена В.С., Наурызбаев М.М., Хантемиров Р.М. Методы дендрохронологии. Ч. 1: Основы дендрохронологии. Сбор и получение древесно-кольцевой информации. Красноярск: изд. Красноярского гос. ун-та, 2000. 80 с.
- Bodo B.A. Monthly Discharges for 2400 Rivers and Streams of the former Soviet Union [FSU]. Toronto, Canada, 2000. V. 1.0.
- Briffa K.R., Osborn T.J., Schweingruber F.H., Harris I.C., Jones P.D., Shiyatov S.G., Vaganov E.A. Low-frequency temperature variations from a northern tree-ring-density network // Journ. of Geophys. Research. 2001. № 106. P. 2929–2941.
- Buntgen U., Esper J., Frank D.C., Nicolussi K., Schmidhalter M.A. 1052-year tree-ring proxy for Alpine summer temperatures // Climate Dynamics. 2008. № 25. P. 141–153.
- Cook E.R., Anchukaitis K.J., Buckley B.M., D'Arrigo R.D., Jacoby G.C., Wright W.E. Monsoon Asia Drought Atlas (MADA). IGBP PAGES/World Data Center for Paleoclimatology Data Contribution Series # 2010-037. NOAA/NCDC Paleoclimatology Program. Boulder CO. USA. 2010.
- Cook E.R., Anchukaitis K.J., Buckley B.M., D'Arrigo R.D., Jacoby G.C., Wright W.E. Asian monsoon failure and megadrought during the Last Millennium // Science. V. 328. № 5977. 23 April 2010. P. 486–489.
- Davi N.K., Jacoby G.C., Curtis A.E., Baatarbileg N. Extension of drought records for central Asia using tree rings: West-central Mongolia // Journ. of Climate. 2006. V. 19. P. 288–299.
- Esper J., Frank D.C., Wilson R., Buntgen U., Treydte K. Uniform growth trends among central Asian low- and high-elevation juniper tree sites // Trees. 2007. V. 21. P. 141–150.
- <http://www.ncdc.noaa.gov/paleo/treering.html> International Tree-Ring Data Bank.
- <http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/hrg-interim/> Climate Archive of CRU 3.1
- <http://hdl.handle.net/10261/22449> Global Archive of SPEI.
- Kirdyanov A.V., Treydte K.S., Nikolaev A., Helle G., Schleser G.H. Climate signals in tree-ring width, density and $\delta^{13}C$ from larches in Eastern Siberia (Russia) // Chem. Geol. 2008. V. 252. P. 31–41.
- MacDonald G., Kremenetski K., Smith L., Hidalgo H.G. Recent Eurasian river discharge to the Arctic Ocean. The context of longer-term dendrochronological records // Journ. of Geophys. Research. 2007. V. 112. G04S50. doi:10.1029/2006JG000333
- Palmer W.C. Meteorological Drought. US Department of Commerce, Washington DC. Research Paper 1965. № 45. 65 p.

27. Schweingruber F. Tree rings: basics and applications of dendrochronology. Kluwer, Academic press, Dordrecht, 1988. 276 p.
28. Torrence C., Compo G.P. A practical guide to wavelet analysis // Bull. Amer. Met. Soc. 1998. V. 79. P. 61–78.
29. Vicente-Serrano S.M., Begueria S., Lypez-Moreno J.I. A multi-scalar drought index sensitive to global warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index – SPEI // Journ. of Climate. 2010. V. 23. P. 1696–1718.
30. Vicente-Serrano S.M., Begueria S., Lypez-Moreno J.I., Angulo M., El Kenawy. A new global 0.5° gridded dataset (1901–2006) of a multiscalar drought index: comparison with current drought index datasets based on the Palmer Drought Severity Index // Journ. of Hydrometeorology. 2010. V. 11. № 4. P. 1033–1043.
31. Wang T., Ren H., Ma K. Climatic signals in tree ring of *Picea schrenkiana* along an altitudinal gradient in the central Tianshan Mountains, northwestern China // Trees. 2005. V. 19. P. 735–741.
32. Wigley T.M.L., Briffa K.R., Jones P.D. On the Average Value of Correlated Time Series, with Applications in Dendroclimatology and Hydrometeorology // Journ. of Climate and Applied Meteorology. 1984. V. 23. P. 201–213.
33. Williams M.W., Konovalov V.G. Central Asia Temperature and Precipitation Data, 1879–2003. Boulder, Colorado: USA National Snow and Ice Data Center, 2008. http://nsidc.org/data/docs/noaa/g02174_central_asia_data/index.html
34. Woodhouse C.A. Reconstructions of past streamflow from tree-rings: placing the gage records in a long term context. Far west Texas Climate Change conference. June 17, 2008. El Paso TX. 22 p.
35. Yuan Y.J., Wei W.S., Esper J., Yu S.L., Zhang R.B. Influence of sampling site and detrending method on correlations and climate signals of spruce tree-ring width chronologies at upper tree line in western Tianshan mountains of Xinjiang // Journ. of Desert Research. 2008. V. 28. № 5. P. 809–814.
36. Yuan Yu., Shao X., Wei W., Yu Sh., Gong Yu., Trouet V. The potential to reconstruct Manasi river streamflow in the northern Tianshan mountains (n.-w. China) // Tree-ring research. 2007. V. 63. № 2. P. 81–93.

Summary

Suggested new method for reconstruction of runoff includes: 1. Search informative points based weather observations for dependence runoff = $f(\text{climate index})$. Climate index consists of normalized anomalies of annual precipitation and air temperature, together with water vapor pressure and total cloud amount in the June–September. 2. The selection of sites that represent local relationship between the index of climate and tree rings. 3. Getting the multivariate linear regression equation between the runoff V and tree rings D . Basic climatic period 1961–1990 is used as a calibration interval of time. Verification of the equations for 1940–1960 identified the need to use other arguments in addition to the width of tree rings. For this purpose, two climate index: $PDSI$ and $SPEI$ were tested. It is established that the empirical formulae $V = f(D, PDSI)$ and $V = f(D, SPEI)$ are suitable for assessing the annual flow of the Naryn in 1901–2006. In the report is described a process of reconstruction of flow for the years 1700–2005 based on the data of the width of the tree rings, and taking into account the temporal variability of parameters of regression equations.

Chronologies of the width and density of tree rings in the thirty-two tree ring sites were used to reconstruct long-term series of average summer air temperature T_s at meteorological stations of the Pamir and Tien Shan. The calibration interval of time was 1961–1990 to find equations $T_s = f(D)$ of third-order multiple regression, and independent control of their quality, done in 1932–1960. Combined correlation coefficient in 10 cases out of 15 was more than 0.80, a relative error of calculation T_s in 1961–1990 ranged from 0.13 to 4.73%, and in 1932–1960 from 0.23 to 8.10%. Duration of the reconstructed series T_s ranged from 100 to 278 years. Positive results were received for predicting a common and glacial runoff of Naryn river, a long-term range of density of tree rings.