

УДК 556.5 (528.8)

PhD

Дж. Б. Ниязов¹
О.Ю. Калашникова²**ДИНАМИКА СТОКА И ПРОГНОЗ ПОЛОВОДЬЯ НА РЕКЕ ВАРЗОБ
ПО ДАННЫМ НАЗЕМНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ**

Ключевые слова: сток реки, внутригодовое изменение стока реки, прогноз водности рек на период половодья, бассейн реки Варзоб, изменение метеопараметров.

По многолетним наблюдениям за период 1990...2016 гг. авторами проанализировано изменение метеорологических параметров в бассейне реки Варзоб и их влияние на изменение стока реки. Были проведены расчеты коэффициентов корреляции стока реки с суммой осадков за холодный и теплый периоды и с температурой воздуха, определены репрезентативные метеостанции. На основе проведенного анализа предложены уравнения для прогноза водности реки Варзоб на период половодья.

Введение. В настоящее время большое внимание уделяется проблеме современного изменения глобального климата, начавшегося с 1970-х годов и имеющего достаточно высокие темпы [5]. В горных регионах, таких как Памиро-Алай, глобальное потепление приводит к деградации оледенения и изменению в частоте, интенсивности различных природных процессов, таких как засухи, наводнения, а в горных районах – сели, оползни, паводки, лавины [8]. Наиболее важным для населения Центральной Азии с их орошаемым земледелием является оценка водных ресурсов, т.к. устойчивое водообеспечение (особенно в летний период) прямым образом зависит от речного стока. Оценка водных ресурсов и предупреждение экстремальной водности на период половодья является важной научно-исследовательской и практической задачей как для управления водными ресурсами в водохозяйственном и

¹ Институт водных проблем гидроэнергетики и экологии Академии Наук Республики Таджикистан, г. Душанбе, Таджикистан

² Центрально-Азиатский Институт Прикладных Исследований Земли, г. Бишкек, Кыргызстан

гидроэнергетическом секторах, так и для обеспечения безопасности от опасных природных явлений (гидрологической засухи, наводнений).

Река Варзоб имеет важное гидроэнергетическое и водохозяйственное значение. На ней расположены три наиболее мощные ГЭС общей мощностью 25113 тыс. кВт, составляющие каскад гидроэлектростанций. Электроэнергия этих ГЭС используется городом Душанбе. Значительная часть стока реки Варзоб забирается Большим Гиссарским каналом на орошение.

Бассейн реки Варзоб относится к Памиро-Алайской горной системе и находится на территории Таджикистана, Центральная Азия (68°30'E-69°00'E; 37°35'N-39°5'N). Площадь бассейна реки Варзоб составляет 1270 км² согласно Государственному водному кадастру [6], по расчетам с использованием ГИС – 1281 км². Бассейн простирается в диапазоне высот от 866 до 4670 м над уровнем моря (м.н.у.м.) (рис. 1). Средняя высота водосбора составляет 2670 м над уровнем моря. Площадь оледенения составляет 36,1 км², или 3 % площади бассейна реки [3].

Бассейн реки Варзоб относится к переднеазиатской (средиземноморской) климатической области с максимумом осадков в холодный период. В верховьях реки среднегодовая температура воздуха составляет -1,8 °С, годовая сумма осадков 440 мм. (по данным метеостанции Анзоб, 3373 м.н.у.м.), в нижнем течении реки Варзоб среднегодовая температура воздуха составляет 14,8 °С, годовая сумма осадков 712 мм. (по данным метеостанции Душанбе, 803 м.н.у.м.) (рис. 1). Осадки за холодный период (ноябрь-март) превышают осадки за теплый период (апрель-октябрь) в 1,6...1,7 раз [2].

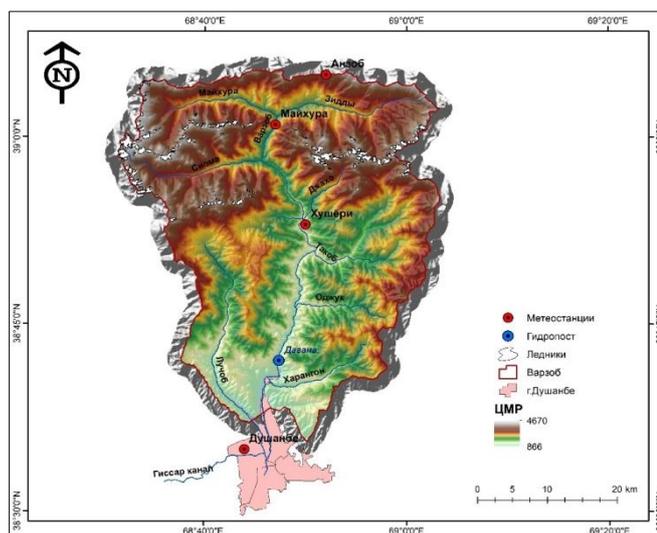


Рис. 1. Бассейн реки Варзоб. Размещение метеостанций и гидропоста Дагана на территории бассейна.

Длина реки Варзоб составляет 71 км. Река является крупным правым притоком реки Кафирниган и образуется при слиянии рек Зидды и Майхуры. Река Варзоб относится к высокогорным рекам снегово-ледникового питания [11].

По данным гидропоста р. Варзоб – Дагана (1056 м.н.у.м.) наблюдательной сети Таджгидромета за период наблюдений с 1990 г. по 2016 г. среднегодовой сток реки составил 49,5 м³/с, в течение года максимальный сток отмечается в мае-июне (максимальный среднемесячный расход воды в июне 1993 г. составил 173 м³/с), минимальный сток отмечается с октября по февраль (12,4...16,1 м³/с) [2]. Половодье на реке Варзоб наблюдается с марта по сентябрь. Река относится к снегово-ледниковому типу питания, пики паводков и максимальные расходы воды проходят в мае и июне.

Основным источником питания реки Варзоб в период половодья являются талые воды сезонного снежного покрова и, в меньшей степени, талые воды ледников. Доля ледникового питания в годовом стоке реки Варзоб составляет около 15 % [4]. Методика прогноза водности реки Варзоб в створе Дагана была разработана в советские годы и в качестве аргумента в ней были использованы данные о максимальных запасах воды в снежном покрове [10]. Для некоторых горных рек также разрабатывались методики прогноза стока на период вегетации по

осадкам. Работы по подготовке методики прогноза стока на основе современных данных были проведены для реки Гунт [7].

Разработка методики прогноза водности реки Варзоб на современном этапе, с учетом изменения климата является основной задачей данного исследования.

Использованные данные и методика обработки данных. Для анализа изменения расходов воды на реке Варзоб использованы фондовые данные Таджгидромета по гидропосту р. Варзоб – Дагана за период с 1990 по 2016 гг. [2]. Анализ влияния на сток метеопараметров был проведен по фондовым данным Таджгидромета по метеостанциям Душанбе, Майхура, Анзоб, Хушьери за период с 1990 по 2016гг. [2].

Для определения основных метеопараметров, влияющих на сток реки Варзоб, использовался статистический метод, с использованием коэффициентов корреляции [9]. Прогностические уравнения для расчета среднего расхода воды реки Варзоб на период половодья были составлены с учетом выявленных наиболее высоких коэффициентов корреляции с метеопараметрами.

Учитывая влияние талого снегового и талого ледникового питания, для расчета стока на период половодья были использованы уравнения множественной линейной корреляции [9, 10]. Расчет был произведен на основе данных о расходах воды за период половодья (март-сентябрь), количестве осадков, накопленных за холодный период времени (октябрь-февраль), характеризующих запасы сезонного снега и температуры воздуха за апрель-май за 27 лет (1990...2016 гг.).

Общий вид уравнений для прогноза водности реки на период половодья следующий:

$$Q_{3-9} = aX_{10-2} + bQ_{10-2} + c, \quad (1)$$

$$Q_{3-9} = aX_{10-2} + bQ_{10-2} + dT_2 + c, \quad (2)$$

где Q_{3-9} – расход воды за период половодья (март-сентябрь); Q_{10-2} – расход воды за период межени (октябрь-февраль); X_{10-2} – сумма осадков за период октябрь-февраль (в мм); T_2, T_4, T_5 – температура воздуха за месяцы февраль, апрель и май; a, b, c, d – коэффициенты регрессии, рассчитанные по наблюдаемым значениям.

Динамика стока реки Варзоб. Река Варзоб относится к снегово-ледниковому типу питания, соотношение стока за месяцы ледникового таяния (июль-сентябрь) к стоку за месяцы таяния сезонного снеготаяния (март-июнь) составляет 0,51 с прохождением пика паводков

(максимального расхода воды) в мае-июне. Половодье на реке Варзоб, вызванное таянием сезонного снега и ледников, отмечается в период с марта по сентябрь.

Среднегодовой расход воды на реке Варзоб (ГП Дагана) составляет $49,5 \text{ м}^3/\text{с}$, при этом средний расход воды в период половодья (март-сентябрь) составляет $74,5 \text{ м}^3/\text{с}$, а в период межени (октябрь-февраль) – $14,4 \text{ м}^3/\text{с}$, что в 5 раз меньше стока за период половодья. Наблюдается тренд с небольшим понижением на $4,8 \text{ м}^3/\text{с}$, среднегодовых расходов воды за период с 1990 г. по 2016 г. (Рис. 2).

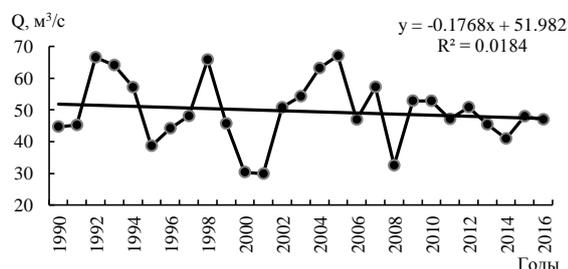


Рис. 2. Изменение среднегодовых расходов воды на реке Варзоб за период 1990...2016 гг.

При этом за тот же период водность реки Варзоб в половодье понижается на $6,2 \text{ м}^3/\text{с}$, а в межень – на $3,0 \text{ м}^3/\text{с}$. (Рис.3, 4).

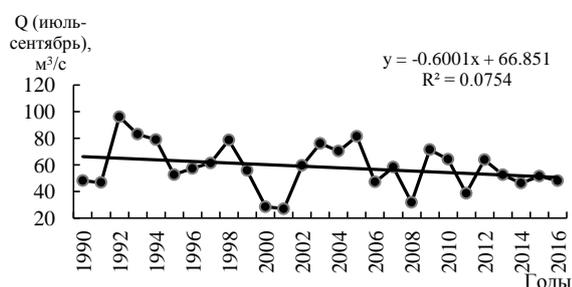


Рис. 3. Изменение средних расходов воды за половодье на реке Варзоб за период 1990...2016 гг.

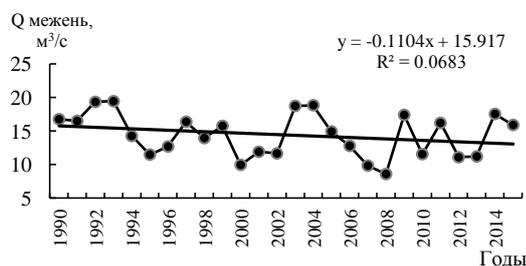


Рис. 4. Изменение средних расходов воды за межень на реке Варзоб за период 1990...2016 гг.

На рис. 5 представлено внутригодовое распределение стока по месяцам в м³/с и в процентах от годового стока.

Внутригодовое распределение стока показывает, что наибольший сток приходится на май-июнь и составляет 19...20 %, в июле – 16 %, в апреле – 13 %, в августе – 9 %, в марте и сентябре – 5 %, в остальные месяцы 2...3 % годового стока (рис.5).

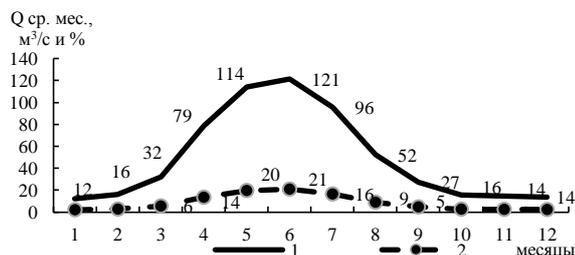


Рис. 5. Внутригодовое распределение стока реки Варзоб. 1 – средний месячный расход воды в м³/с, 2 – средний месячный расход воды в процентах от годового расхода воды.

Влияние метеопараметров на сток реки Варзоб. Влияние метеопараметров на изменение стока реки Варзоб было проанализировано в соответствии с коэффициентом корреляции (R), определяющим тесноту зависимости стока реки за период половодья и осадков за холодный (октябрь-февраль) и теплый (март-сентябрь) периоды, а также среднемесячных температур воздуха по данным четырех метеостанций. Результаты расчетов представлены в таблицах 1, 2 и 3.

Таблица 1

Коэффициенты корреляции стока реки Варзоб за период половодья с суммой осадков за холодный и теплый периоды

Название метеостанций	R с суммой осадков за периоды	
	октябрь-февраль	март-сентябрь
Анзоб	0,62	0,40
Майхура	0,60	0,56
Хушери	0,54	0,09
Душанбе	0,45	0,63

Таблица 2

Коэффициенты корреляции стока реки Варзоб за период половодья со среднемесячной температурой воздуха за теплый период

Название станции	R – коэффициент корреляции с температурой за месяцы							
	3	4	5	6	7	8	9	
Анзоб	-0,11	0,11	-0,31	-0,41	-0,08	-0,48	-0,11	
Майхура	-0,22	-0,47	-0,76	-0,54	0,01	-0,40	-0,16	
Хушери	-0,30	-0,16	-0,61	-0,56	-0,29	-0,47	-0,16	
Душанбе	-0,18	-0,22	-0,64	-0,51	-0,27	-0,49	-0,24	

Таблица 3

Коэффициенты корреляции стока реки Варзоб за период половодья со среднемесячной температурой воздуха за холодный период

Название станции	R – коэффициент корреляции с температурой за месяцы				
	1	2	10	11	12
Анзоб	-0,11	0,11	-0,08	-0,48	-0,11
Майхура	-0,22	-0,47	0,01	-0,40	-0,16
Хушери	-0,30	-0,16	-0,29	-0,47	-0,16
Душанбе	-0,18	-0,22	-0,27	-0,49	-0,24

Результаты расчетов тесноты зависимости между расходами воды за период половодья и суммой осадков за холодный и теплый периоды и с температурой воздуха были следующими:

– наиболее высокий коэффициент корреляции 0,60...0,62 оказался с суммой осадков за холодный период (октябрь-февраль) по данным МС Майхура и Анзоб;

– также коэффициент корреляции с суммой осадков за теплый период (март-сентябрь) по данным МС Душанбе составил 0,63;

– наиболее высокие коэффициенты корреляции с температурой воздуха за май 0,61...0,76 оказались по данным МС Хушери, Душанбе и Майхура;

– коэффициенты корреляции с температурой воздуха за июнь и август составили 0,40...0,56 по данным всех метеостанций в бассейне р. Варзоб;

– коэффициент корреляции с температурой воздуха за апрель и февраль по данным МС Майхура составил 0,47.

Анализ результатов рассчитанных коэффициентов корреляции расходов воды за период половодья с метеопараметрами показывает наибольшую зависимость от осадков за холодный период, которые формируют запасы сезонного снега в бассейне реки Варзоб, а также от температуры воздуха в месяцы таяния сезонного снежного покрова (апрель, май, июнь). Как показатель «суровости зимы» в период формирования снеготпасов [1], температура воздуха в феврале по данным метеостанции Майхура также имеет тесноту зависимости 0,47. Водность в период половодья также зависит от осадков в весенне-летний период в нижнем течении р. Варзоб. Кроме того, температура воздуха в августе влияет на интенсивность таяния ледников в высокогорной зоне бассейна.

Прогноз водности реки Варзоб на период половодья. Анализ влияния метеопараметров на сток выявил несколько характеристик, которые можно использовать в качестве аргументов (предикторов) для

составления прогностических уравнений по определению расхода воды на период половодья. В основе уравнений была использована множественная линейная регрессия. Уравнения для прогноза расхода воды на период половодья на реке Варзоб представлены в таблице 4.

Таблица 4

Уравнения и коэффициенты корреляции (R^2) для прогноза расхода воды на период половодья на реке Варзоб.

Уравнения	R^2
$Q_{3-9} = 0,06X_{10-2}(\text{Майхура}) + 1,19Q_{10-2}(\text{Дагана}) + 24,7$	0,44
$Q_{3-9} = -0,9T_2(\text{Майхура}) + 0,007X_{10-2}(\text{Майхура}) + 0,47Q_{10-2}(\text{Дагана}) + 37,6$	0,49
$Q_{3-9} = -3,5T_4(\text{Майхура}) + 0,05X_{10-2}(\text{Майхура}) + 0,71Q_{10-2}(\text{Дагана}) + 50,1$	0,61
$Q_{3-9} = -5,3T_5(\text{Майхура}) + 0,04X_{10-2}(\text{Майхура}) + 0,46Q_{10-2}(\text{Дагана}) + 106$	0,72
$Q_{3-9} = 0,09X_{10-2}(\text{Анзоб}) + 0,88Q_{10-2}(\text{Дагана}) + 40,6$	0,42
$Q_{3-9} = -5,2T_5(\text{Душанбе}) + 0,08X_{10-2}(\text{Анзоб}) + 0,39Q_{10-2}(\text{Дагана}) + 154$	0,68

Наиболее достоверный прогноз водности учитывает три аргумента:

1. Осадки, накопленные за холодный период времени в горах республики на высоте свыше 1900 м.н.у.м. (Майхура, 1922 м.н.у.м. и Анзоб 3373 м.н.у.м.);
2. Температура воздуха за февраль, апрель и май по МС Майхура и за май по МС Душанбе;
3. Расходы воды за период межени по реке Варзоб гидропост Дагана.

Графики зависимости расходов воды за период половодья от аргументов представлены на рисунках 6, 7, 8, 9, 10, 11.

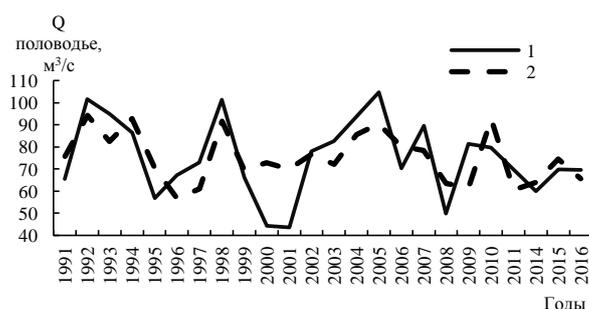


Рис. 6. График зависимости расходов воды за период половодья от осадков с октября по февраль по МС Майхура и расходов воды за период межени по гидропосту р.Варзоб – Дагана. 1 – фактический, 2 – спрогнозированный расход воды.

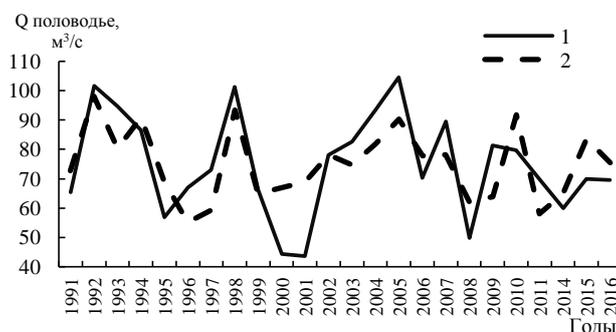


Рис. 7. График зависимости расходов воды за период половодья от осадков с октября по февраль по МС Майхура, расходов воды за период межени по гидропосту р. Варзоб – Дагана и температуры воздуха за февраль по МС Майхура. 1 – фактический, 2 – спрогнозированный расход воды.

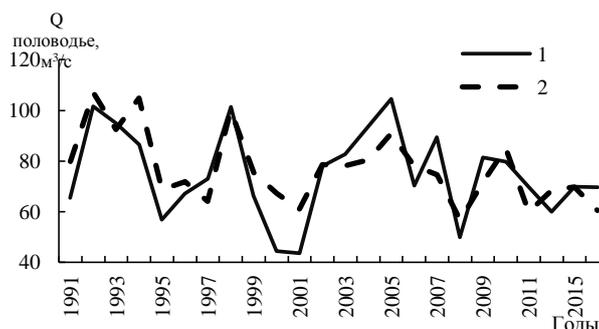


Рис. 8. График зависимости расходов воды за период половодья от осадков с октября по февраль по МС Майхура, расходов воды за период межени по гидропосту р. Варзоб – Дагана и температуры воздуха за апрель по МС Майхура. 1 – фактический, 2 – спрогнозированный расход воды.

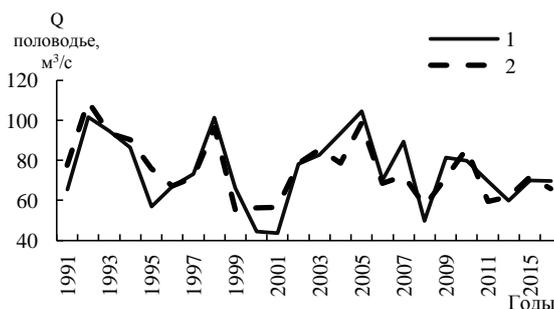


Рис. 9. График зависимости расходов воды за период половодья от осадков с октября по февраль по МС Майхура, расходов воды за период межени по гидропосту р. Варзоб – Дагана и температуры воздуха за май по МС Майхура. 1 – фактический, 2 – спрогнозированный расход воды.

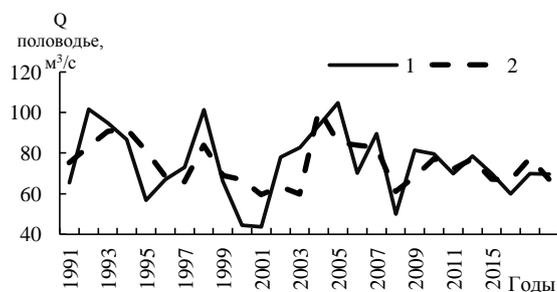


Рис. 10. График зависимости расходов воды за период половодья от осадков с октября по февраль по МС Анзоб и расходов воды за период межени по гидропосту р. Варзоб – Дагана 1 – фактический, 2 – спрогнозированный расход воды.

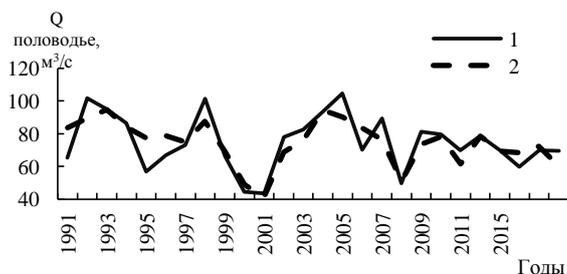


Рис. 11. График зависимости расходов воды за период половодья от осадков с октября по февраль по МС Анзоб, расходов воды за период межени по гидропосту р. Варзоб – Дагана и температуры воздуха за май по МС Душанбе 1 – фактический, 2 – спрогнозированный расход воды.

Заключение. Среднегодовые расходы воды за период с 1990 г. по 2016 г. имеют тренд на понижение – на $4,8 \text{ м}^3/\text{с}$. При этом за тот же период водность реки Варзоб в половодье понижается на $6,2 \text{ м}^3/\text{с}$, а в межень – на $3,0 \text{ м}^3/\text{с}$.

Анализ тесноты зависимости расходов воды за период половодья с метеопараметрами показал, что в бассейне реки Варзоб расположены репрезентативные метеостанции. Данные о сумме осадков за холодный период по МС Майхура и Анзоб имеют наибольшую корреляцию со стоком и могут быть использованы в прогнозе стока на период половодья ($R=0,60\dots0,62$).

Данные о температуре воздуха за июнь и август по всем метеостанциям бассейна реки Варзоб имеют корреляцию со стоком $0,40\dots0,56$, а за февраль и апрель по МС Майхура – $0,47$. Данные о температуре воздуха за май по данным МС Хушери, Душанбе, Майхура имеют наиболее высокую корреляцию со стоком ($R=0,61\dots0,76$) и могут быть использованы в прогнозе стока на период половодья. Также увеличивается достоверность прогноза с учетом предшествующего стока за период межени (октябрь-февраль).

В статье предложены уравнения для прогноза водности на период половодья по данным наземных наблюдений о сумме осадков и температуре воздуха. Коэффициенты корреляции уравнений составили $R^2=0,44...0,72$. Наиболее достоверный прогноз водности на период половодья получается с учетом температуры воздуха за апрель ($R^2=0,61$) и за май ($R^2=0,68...0,72$). Однако к моменту составления прогноза водности на период половодья (в марте) необходим прогноз температурных аномалий апреля и мая для расчета прогноза стока.

Достоверный прогноз экстремальной водности на период половодья (маловодье или многоводья) должен составляться с учетом прогноза температуры воздуха на май.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аполлов Б.А., Калинин Г.П., Комаров В.Д. Курс гидрологических прогнозов. Л.: Гидрометеиздат, 1974. – С. 246-283
2. Данные фондов Таджгидромета.
3. Каталог ледников СССР. Т. 14. Средняя Азия. Выпуск 3. Амударья. Ч.5. Бассейн р. Кофирнигана // В.И. Квачев, А.Г. Санников, Л.Н. Соколов. – Л.: Гидрометеиздат, 1968. – 44 с.
4. Коновалов В.Г. Таяние и сток с ледников в бассейнах Средней Азии. САРНИГМИ. – Л.: Гидрометеиздат, 1985. – С. 217-218.
5. МГЭИК 2014. Изменение климата, 2014 г.: Обобщающий доклад. Вклад Рабочих групп 1, 2 и 3 в «Пятый оценочный доклад Межправительственной группы экспертов по изменению климата». Женева, 2014. – 163 с.
6. Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. Государственный водный кадастр. Л.: Гидрометеиздат, 1987. – Т. 12.
7. Ниязов Дж.Б., Калашникова О.Ю., Мирзохонова С.О., Наврузшоев Х.Д. Влияние метеопараметров на сток и прогноз половодья на реке Гунт (приток реки Пяндж, бассейн реки Амударья, Таджикистан) // Дистанционные и наземные исследования в Центральной Азии: Материалы Международной научной конференции, посвященной 15-летию со дня образования ЦАИИЗ., Бишкек, Кыргызстан, 2019. – Бишкек, 2019. – С. 178-186.
8. Опасные природные явления в Таджикистане // Материалы Организации по безопасности и сотрудничеству в Европе (ОБСЕ): Офис программ в Душанбе. Душанбе, Таджикистан, 2018. <https://www.osce.org/ru/programme-office-in-dushanbe>

9. Подрезов О.А. Методы статистической обработки и анализа гидрометеорологических наблюдений. Часть 1. Бишкек: КРСУ ЕТФ, 2019. – 170с.
10. Руководство по гидрометеорологическим прогнозам, выпуск 1. Л.: Гидрометеиздат, 1989 – 357с.
11. Шульц В.Л. Реки Средней Азии. САНИГМИ. Л.: Гидрометеиздат, 1965 – С. 169-173.

Поступила 20.03.2020

PhD

Дж. Б. Ниязов
О. Ю. Калашникова

ВАРЗОБ ӨЗЕНІНІҢ ЖЕР ҮСТІ БАҚЫЛАУ ДЕРЕКТЕРІ БОЙЫНША АҒЫН ДИНАМИКАСЫ ЖӘНЕ СУ ТАСУ БОЛЖАМЫ

Түйін сөздер: өзен ағыны, өзен ағынының жыл сайынғы өзгерісі, су тасқыны кезеңіндегі өзен сулылығының болжамы, Варзоб өзенінің бассейні, метеорологиялық параметрлердің өзгеруі.

1990...2016 жылдар аралығындағы ұзақ мерзімді бақылауларға сәйкес авторлар Варзоб өзенінің бассейніндегі метеорологиялық параметрлердің өзгеруіне және олардың өзен ағынының өзгеруіне әсерін талдады. Өзен ағысының суық және жылы кезеңдегі жауын-шашын мөлшерімен және ауа температурасымен корреляция коэффициенттері есептелді, өкілетті метеостанциялар анықталды. Талдау негізінде Варзоб өзенінің су басу кезеңіндегі сулылығын болжау үшін теңдеулер ұсынылады.

J. Niyazov, O. Kalashnikova

THE RUN-OFF DYNAMICS AND FLOOD FORECAST ON THE VARZOB RIVER FROM GROUND-BASED OBSERVATION DATA

Key words: river runoff, intra-annual change in river runoff, forecast of river water content for the flood period, Varzob river basin, change in meteorological parameters.

The authors analyzed the change in meteorological parameters in the Varzob basin and their influence on the change in river run-off according to long-term observations for the period 1990...2016. The calculations of the correlation coefficients of the river run-off with the

sum of precipitation for the cold and warm periods and with air temperature were carried out and representative weather stations were determined. The equations for predicting the water content of the Varzob River for a flood period were proposed based on the analysis.