

# Гидрология и водное хозяйство

## Гидрология және су шаруашылығы

### Hydrology and water management

---

---

<https://doi.org/10.55764/2957-9856/2024-3-3-13.21>

МРНТИ 70.01.11

УДК 556

С. К. Давлетгалиев<sup>1</sup>, А. А. Турсунова<sup>2</sup>, А. Т. Базарбек<sup>\*3</sup>

<sup>1</sup> Д. г. н., профессор (Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан; [sdavletgaliev@mail.ru](mailto:sdavletgaliev@mail.ru))

<sup>2</sup> К. г. н., ассоциированный профессор, руководитель лаборатории водных ресурсов (АО «Институт географии и водной безопасности», Алматы, Казахстан; [ais.tursun@bk.ru](mailto:ais.tursun@bk.ru))

<sup>3\*</sup> Младший научный сотрудник (АО «Институт географии и водной безопасности», Алматы, Казахстан; [aydanabt@gmail.com](mailto:aydanabt@gmail.com))

## ОЦЕНКА И ПРОГНОЗ МЕСЯЧНОГО СТОКА БАСЕЙНА РЕКИ АРЫС МЕТОДОМ КАНОНИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ

**Аннотация.** В работе рассмотрена возможность использования результатов совместного моделирования стока и стокообразующих факторов для оценки и прогноза водных ресурсов бассейна реки Арыс. Для решения этой задачи использован метод канонического разложения, который позволяет охарактеризовать случайный процесс (речной сток) совокупностью независимых случайных величин и неслучайных функций. Метод является оптимальным в классе линейных преобразований, разложение осуществляется по естественным ортогональным составляющим. По двум сценариям, RCP 4.5 и RCP 8.5, спрогнозированы месячные, годовые и вегетационные гидрографы речного стока реки Арыс на 2030, 2040 и 2050 годы. Результаты исследования показали, что изменения речного стока к 2030, 2040, 2050 гг. колеблются около климатической нормы 1974-2019 гг. как в сторону уменьшения, так и увеличения. Использование модели канонического разложения на основе зависимости стока от климатических характеристик вполне оправдано полученными результатами.

**Ключевые слова:** месячный сток, гидрограф стока, осадки, статистическое моделирование, каноническое разложение, стокообразующие факторы, метеорологические факторы, прогноз речного стока.

**Введение.** С признанием глобальных изменений климата [1-5] широкое распространение получили методы прогнозной оценки, основанные на зависимости стока от метеорологических элементов как основных факторов формирования стока, наиболее подверженных изменениям. Так, имея тесную статистическую связь между стоком и метеоэлементами за ретроспективу, можно использовать ее как прогностическую и, подставляя прогнозные значения метеоэлементов, получать прогнозные значения стока. Для этого необходимы надежные прогнозы климата, но дать их с высокой степенью вероятности на долгосрочную перспективу не представляется возможным. В этой ситуации разработаны различные варианты развития климатических изменений, так называемые «сценарии» или «сценарные прогнозы» [6-8].

Использование МОЦАО (модели общей циркуляции атмосферы и океана) при прогнозировании речного стока дает неплохие результаты [9-14], однако климатические модели имеют недостаточное пространственное разрешение, а потому не учитывают региональные особенности территорий.

В данных исследованиях рассматривается густонаселенный регион Казахстана – бассейн р. Арыс. Бассейн р. Арыс расположен между хребтом Таласский Алатау и его отрогами на юге и хребтом Каратау на севере. Высота Таласского Алатау на востоке превышает 4000 м. Вершины

хребта покрыты вечными снегами, а в истоках рек Жабагылысу и Аксу (левые притоки) имеются небольшие ледники.

Границы бассейна, ясно выраженные в восточной его части по хребтам Таласский Алатау и Каратау, на западе среди равнинной местности теряют свою определенность. Общая площадь бассейна составляет 14 900 км<sup>2</sup>, на горную его часть приходится 7170 км<sup>2</sup>, или около 50% [15-17].

В пределах Республики Казахстан до р. Сырдария доносит свои воды только р. Арыс с притоками Жабагылысу, Аксу, Боролдай и Бадам (рисунок 1). Река Арыс в Толебийском и Сайрамском районах Туркестанской области – важный бассейн для экономического развития Казахстана. Водопотребление в бассейне осуществляется на нужды сельского хозяйства, куда входят орошаемое земледелие, сельскохозяйственное водоснабжение сельских населенных пунктов и обводнение пастбищ [18].

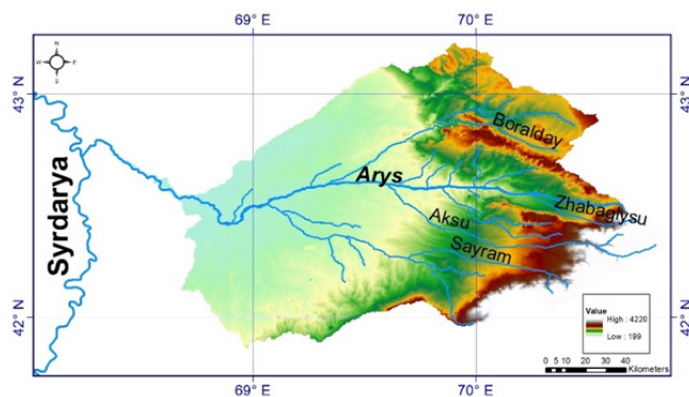


Рисунок 1 – Карта-схема бассейна реки Арыс

Figure 1 – Map of the Arys River basin

**Объект исследования.** Координаты реки Арыс 42°31'01" с. ш., 70°37'39" в. д. и 42°47' с. ш., 68°14' в. д., она берет начало в урочище Шакпак, представляющем собой седловину между хребтами Таласский Алатау и Каратау. Исток реки образуется от слияния родников в 7 км выше с. Веселое. Площадь водосбора реки Арыс до ж.-д. ст. Арыс составляет 13 000 км<sup>2</sup>, бассейн расположен в диапазоне высот 200-4200 м. Средняя высота бассейна равна 900 м. Около 85 % площади водосбора находится в диапазоне высот 200-1500 м, длина реки 378 км.

Река Арыс протекает в трех основных ландшафтных зонах: горной – от истоков до устья р. Кокбулак; предгорной – между устьями рек Кокбулак и Бадам; равнинной – ниже устья р. Бадам [15-17].

**Материалы и методы.** Гидрологическое моделирование дает возможность прогнозирования стока и предупреждения опасных гидрологических явлений, в том числе различные сценарии развития событий в зависимости от входных параметров и последующую корректировку планируемой деятельности. При этом необходимы обязательное техническое сопровождение и потребность в прикладных программах, что можно отнести к недостаткам метода, так как все это требует больших финансовых вложений. Поэтому во многих странах материальное обеспечение научных центров, занимающихся моделированием, берет на себя правительство – ведь контроль, регулирование, своевременное предупреждение чрезвычайных ситуаций – это необходимая мера для благополучия и успешного развития любого государства [19-21].

Статистическое моделирование представляет собой метод получения с помощью программно-технических средств ЭВМ статистических данных о процессах, происходящих в моделируемой системе [22]. Так, рассматривая речной сток как вероятностный процесс, производится статистическая оценка его показателей (стокообразующих факторов), на основе которой моделируется поведение реального процесса стока в произвольные моменты времени. Моделирование случайных (вероятностных) процессов строится на основе базовых распределений случайных величин. В этом отношении наиболее подходящим методом статистического моделирования является метод канонического разложения, который позволяет охарактеризовать случайный процесс (речной сток) совокупностью независимых случайных величин и неслучайных функций [23-25].

Теорию канонических разложений случайных функций и ее применение в аэродинамике в 1950-х гг. предложил выдающийся советский ученый в области авиационного вооружения Пугачев В. С. [26]. Идея метода канонических разложений состоит в том, что случайная функция, над которой нужно произвести те или иные преобразования, предварительно представляется в виде суммы так называемых элементарных случайных функций. Метод является оптимальным в классе линейных преобразований, разложение осуществляется по естественным ортогональным составляющим (метод главных компонент). «Каноническое» означает образцовое, основополагающее; «канон» с греческого переводится как «правило, образец».

Применение канонического разложения для моделирования речного стока апробировала группа ученых-водников: Давлетгалиев С. К., Бусалаев И. В., Куперман И. Г. [25-27]. Они представили месячный речной сток, атмосферные осадки и температуру воздуха как три случайные векторные функции:

$$Q(t) = m_Q(t) + \sum_{v=1}^M \varphi_{v1}^{(1)}(t) V_v^{(1)},$$

$$P(t) = m_p(t) + \sum_{v=1}^M \varphi_{v2}^{(1)}(t) V_v^{(1)} + \sum_{v=1}^M \varphi_{v2}^{(2)}(t) V_v^{(2)},$$

$$T(t) = m_T(t) + \sum_{v=1}^M \varphi_{v3}^{(1)}(t) V_v^{(1)} + \sum_{v=1}^M \varphi_{v3}^{(2)}(t) V_v^{(2)} + \sum_{v=1}^M \varphi_{v3}^{(3)}(t) V_v^{(3)},$$

где  $Q(t)$  – речной сток,  $P(t)$  – атмосферные осадки,  $T(t)$  – температура воздуха;  $m_Q(t)$ ,  $m_p(t)$ ,  $m_T(t)$  – математическое ожидание составляющих  $Q(t)$ ,  $P(t)$ ,  $T(t)$ ;  $V_v^{(1)}$ ,  $V_v^{(2)}$ ,  $V_v^{(3)}$  – некоррелированные случайные величины, математические ожидания которых равны нулю;  $\varphi_{v2}^{(1)}(t)$ ,  $\varphi_{v3}^{(1)}(t)$  – взаимные координатные функции  $Q(t)$  с составляющими  $P(t)$  и  $T(t)$ ,  $\varphi_{v3}^{(2)}(t)$  – то же, составляющих  $P(t)$  и  $T(t)$ ,  $\varphi_{v3}^{(3)}(t)$  – то же, составляющей  $T(t)$ .

Из формулы следует, что сначала строится каноническое разложение стока первой составляющей  $Q(t)$ , как и в случае одномерного разложения, затем по значениям  $\varphi_{v2}^{(1)}(t)$ ,  $\varphi_{v2}^{(2)}(t)$  – каноническое разложение второй составляющей  $P(t)$ , по функциям  $\varphi_{v3}^{(1)}(t)$ ,  $\varphi_{v3}^{(2)}(t)$ ,  $\varphi_{v3}^{(3)}(t)$  – разложение третьей составляющей  $T(t)$ .

Процесс моделирования заключается в получении последовательности случайных чисел, равномерно распределенных в интервале от 0 до 1; перевод этих чисел в обеспеченности; определение по ним соответствующего значения случайной величины, т.е. модульного коэффициента стока заданного закона распределения. Закон распределения устанавливается по данным наблюдений, по вычисленным значениям параметров  $\bar{Q}$ ,  $C_v$  и  $C_s$ . В качестве такого закона может быть принята кривая Крицкого-Менкеля или Пирсона III типа. Коррелированность рядов учитывается по уравнению регрессии, включающей коэффициент автокорреляции [22].

**Результаты и их обсуждение.** В работе показана возможность использования результатов совместного моделирования стока и стокообразующих факторов (атмосферных осадков) для оценки и прогноза водных ресурсов бассейна реки Арыс на примере гидрологического поста р. Аксу – а. Саркырама. Для решения этой задачи использован метод канонического разложения. Прогнозы гидрографа месячного, годового и вегетационного стока реки Арыс составлены на 2030, 2040 и 2050 гг.

Алгоритм моделирования величин месячного стока и осадков подробно изложен в работах [22, 27].

Использованы данные наблюдений за среднемесячным расходом воды с 1974 по 2018 г. и месячной суммой осадков за тот же период по близлежащей метеостанции. Предварительно проверялась корреляционная связь между стоком и осадками (рисунок 2). При  $R > 0,7$  метеоданные

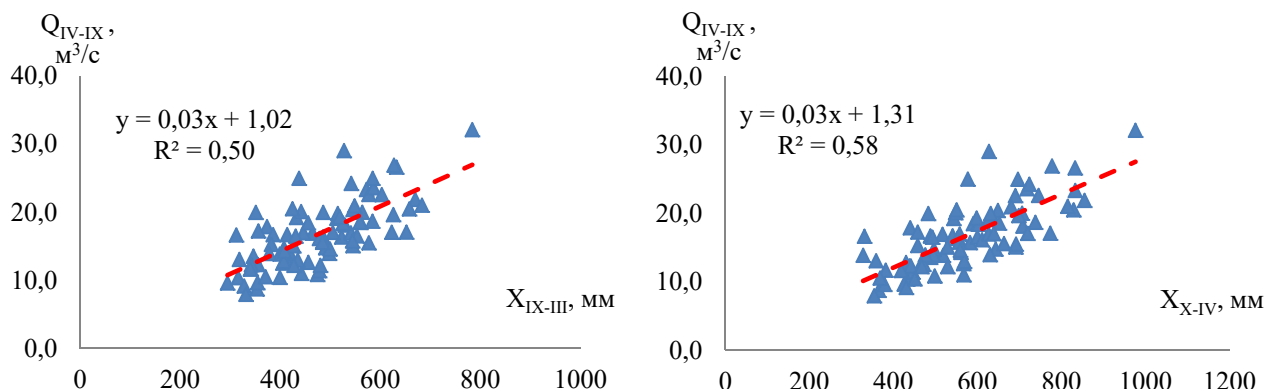


Рисунок 2 – График корреляционной связи между стоком (ГП р. Аксу – а. Саркырама) и атмосферными осадками (МС Тасарык)

Figure 2 – The graph of the correlation between the runoff (Hydropost Aksu River – Sarkyrama village) and atmospheric precipitation (Meteostation Tasaryk)

принимались для дальнейшего моделирования. Удовлетворительные статистические параметры стока и осадков наблюдаемых и смоделированных рядов целесообразны для составления сценарных прогнозов речного стока.

Согласно разработанному алгоритму подготовлены входные данные для моделирования (проведена проверка на однородность гидрологических и метеорологических рядов, рассчитаны основные характеристики – норма,  $C_s$ ,  $C_v$ ).

Моделирование производилось в специальной программе FORTRAN. Длина смоделированных рядов составила 500 лет, что является оптимальным для выборки. Качество модели оценивалось по степени соответствия параметров исходных и смоделированных рядов. Сравнение параметров месячных значений изучаемых величин приведено в таблице 1. В последней графе таблицы даны характеристики годовых величин стока и осадков, полученные из наблюдаемых и смоделированных месячных значений стока и осадков.

Таблица 1 – Статистические параметры среднемесячных расходов воды и осадков для наблюдаемых (1-я строка) и смоделированных (2-я строка) рядов (n=500) р. Аксу – а. Саркырама и МС Тасарык

Table 1 – Statistical parameters of average monthly stream flow and precipitation for the observed (1st line) and modeled (2nd line) series (n=500) river Aksu – v. Sarkyrama and meteostation Tasaryk

Параметры	Месяцы												Год
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
Р. Аксу – а. Саркырама													
$Q_s, m^3/c$	3,79	3,60	4,32	10,1	19,7	29,5	24,0	13,6	7,99	5,75	4,94	4,34	11,0
	3,93	3,70	4,42	10,5	20,0	29,8	24,2	13,6	7,98	5,74	4,91	4,27	11,1
$C_v$	0,20	0,22	0,38	0,43	0,35	0,33	0,32	0,27	0,24	0,22	0,22	0,22	0,26
	0,19	0,22	0,38	0,43	0,35	0,33	0,31	0,27	0,25	0,23	0,24	0,24	0,26
$C_s/C_v$	1	1	5	2	1	1	1	2	1	1	1	1	1
	2	1	5	2	1	1	1	2	2	2	1	2	1
$r$	0,83	0,76	0,46	0,18	0,42	0,29	0,35	0,20	0,29	0,64	0,68	0,71	0,35
	0,82	0,77	0,41	0,10	0,36	0,18	0,27	0,14	0,24	0,63	0,68	0,70	0,28
Осадки													
$X_s, mm$	71,8	77,1	98,2	115,2	95,5	36,2	21,4	12,4	17,74	66,0	80,8	80,1	773
	69,9	74,7	99,6	115,7	99,4	38,3	22,5	12,5	17,38	65,1	82,4	79,9	781
$C_v$	0,44	0,48	0,41	0,42	0,54	0,76	1,22	1,29	1,00	0,77	0,62	0,49	0,18
	0,43	0,47	0,41	0,43	0,54	0,76	1,19	1,26	1,03	0,76	0,63	0,47	0,19
$C_s/C_v$	1	3	1	1	1	1	2	2	1	1	1	1	4
	2	3	1	1	1	1	2	3	1	1	1	1	1
$r$	0,04	0,15	-0,08	-0,06	0,19	0,21	0,16	-0,13	-0,01	-0,01	-0,16	0,07	0,27
	0,07	0,07	-0,06	-0,12	0,16	0,20	0,16	-0,11	-0,04	-0,04	-0,13	0,02	0,02

Как видно из таблицы 1, по всем выбранным параметрам прослеживается хорошее соответствие средних значений и коэффициентов вариации речного стока и атмосферных осадков при продолжительности смоделированных рядов 500 лет ( $n=500$ ). Расхождение между наблюдаемыми и смоделированными значениями коэффициентами асимметрии и автокорреляции первого порядка лежат в пределах точности расчета этих параметров. В таблицах 2 и 3 приведены фрагменты корреляционной и взаимнокорреляционной матрицы стока и осадков.

Таблица 2 – Корреляционная матрица среднемесячных расходов воды (р. Аксу – а. Саркырама) и месячных количеств осадков (МС Тасарык) для наблюдаемых (1-я строка) и смоделированных (2-я строка) рядов ( $n=500$ )

Table 2 – Correlation matrix of observed (Line 1) and modeled (Line 2) series ( $n=500$ ) of average monthly water discharges (Aksu River – Sarkyrama village) and monthly precipitation (meteostation Tasaryk)

Месяц	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Р. Аксу – а. Саркырама												
I	1	0,88	0,65	0,53	0,58	0,47	0,38	0,41	0,51	0,64	0,66	0,65
		0,89	0,46	0,28	0,46	0,29	0,23	0,20	0,33	0,57	0,65	0,69
II		1	0,75	0,56	0,63	0,46	0,35	0,33	0,45	0,63	0,66	0,61
			0,59	0,34	0,56	0,35	0,28	0,21	0,35	0,62	0,71	0,71
III			1	0,66	0,71	0,63	0,43	0,47	0,44	0,64	0,63	0,50
				0,55	0,67	0,60	0,40	0,41	0,41	0,59	0,58	0,48
IV				1	0,80	0,77	0,69	0,69	0,65	0,64	0,59	0,43
					0,77	0,77	0,70	0,71	0,67	0,55	0,50	0,40
V					1	0,83	0,70	0,65	0,62	0,70	0,78	0,67
						0,81	0,70	0,64	0,66	0,71	0,73	0,65
VI						1	0,81	0,71	0,62	0,60	0,64	0,52
							0,77	0,66	0,60	0,52	0,52	0,44
Осадки												
VII							1	0,14	0,39	0,00	0,08	-0,27
								0,05	0,41	0,00	0,04	-0,27
VIII								1	-0,08	-0,14	-0,29	-0,23
									-0,04	-0,08	-0,20	-0,12
IX									1	0,11	0,02	-0,32
										0,11	-0,03	-0,28
X										1	-0,14	-0,01
											-0,16	-0,02
XI											1	0,01
												-0,02
XII												1

Модель канонического разложения также хорошо воспроизводит корреляционную и взаимнокорреляционную матрицу исходных и смоделированных данных.

Далее проводилась проверка полученных результатов путем сравнения смоделированных значений с фактическими данными для различных по водности лет (таблица 4). Для этой цели, согласно [28], по фактическим данным наблюдений были выбраны многоводные, средневодные и маловодные годы, за которые определялись следующие параметры: количество годовых осадков, количество осадков за вегетационный период, годовой сток, сток за вегетационный период. В соответствии с указанными параметрами фактических осадков выбирались их приближенные смоделированные значения по порядковому номеру реализации, которых всего 500. По номерам реализаций осадков определялись соответствующие им значения смоделированного месячного стока. Так как реализаций может быть несколько, значения месячного стока осреднялись.

Таблица 3 – Взаимнокорреляционная матрица среднемесячных расходов воды (р. Аксу – а. Саркырама) и месячных количеств осадков (МС Тасарык) для наблюдаемых (1-я строка) и смоделированных (2-я строка) рядов (n=500)

Table 3 – Cross-correlation matrix of average monthly water discharges (Aksu River – Sarkyrama village) and monthly precipitation (meteostation Tasaryk) for observed (Line 1) and modeled (Line 2) series (n= 1000)

Месяц	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
I	0,07	0,06	0,27	0,11	0,24	0,23	0,22	0,22	0,11	0,10	0,09	0,08
	-0,05	-0,07	0,09	0,03	0,17	0,16	0,14	0,15	0,05	0,01	-0,04	-0,03
II	0,13	0,29	0,30	0,54	0,45	0,55	0,50	0,40	0,35	0,36	0,33	0,18
	0,01	0,13	0,18	0,50	0,37	0,51	0,49	0,40	0,37	0,28	0,25	0,16
III	0,18	0,21	0,31	0,39	0,31	0,42	0,47	0,45	0,37	0,35	0,24	0,12
	0,02	0,07	0,21	0,32	0,20	0,36	0,38	0,36	0,28	0,15	0,09	0,04
IV	0,16	0,06	0,19	0,49	0,42	0,53	0,56	0,62	0,50	0,30	0,23	0,19
	-0,02	-0,04	0,14	0,55	0,41	0,53	0,50	0,60	0,47	0,20	0,11	0,08
V	0,03	0,00	-0,02	0,15	0,20	0,31	0,47	0,41	0,31	0,21	0,06	0,08
	0,02	0,01	-0,02	0,18	0,22	0,30	0,46	0,39	0,29	0,17	0,05	0,05
VI	0,37	0,36	0,17	0,18	0,29	0,18	0,31	0,32	0,33	0,30	0,23	0,30
	0,26	0,29	0,19	0,21	0,33	0,18	0,31	0,30	0,33	0,30	0,25	0,25
VII	0,28	0,27	0,10	0,06	0,19	-0,05	0,28	0,41	0,45	0,42	0,24	0,22
	0,15	0,19	0,12	0,05	0,19	-0,05	0,28	0,39	0,44	0,33	0,21	0,18
VIII	-0,09	0,08	0,11	0,11	0,18	0,19	0,23	0,15	0,14	0,19	0,03	-0,03
	-0,06	-0,01	0,00	0,01	0,09	0,14	0,16	0,08	0,05	0,05	-0,03	-0,05
IX	0,02	0,06	-0,02	0,04	0,03	-0,09	0,09	0,14	0,08	0,32	0,29	0,25
	0,00	0,02	-0,04	0,05	0,03	-0,11	0,14	0,19	0,16	0,28	0,20	0,18
X	-0,05	-0,07	-0,14	-0,22	-0,08	-0,19	-0,28	-0,28	-0,21	-0,09	0,14	0,10
	0,05	0,04	-0,06	-0,21	-0,04	-0,16	-0,24	-0,25	-0,16	-0,04	0,11	0,12
XI	0,06	0,08	-0,06	-0,12	0,06	0,05	-0,05	-0,15	-0,14	-0,14	0,12	0,18
	0,06	0,11	0,07	-0,03	0,06	0,07	-0,04	-0,17	-0,12	-0,02	0,14	0,15
XII	0,03	-0,09	-0,14	-0,07	-0,08	-0,01	-0,02	-0,06	0,03	-0,06	-0,05	0,14
	0,04	-0,01	0,02	0,14	0,07	0,16	0,09	0,05	0,08	0,00	-0,01	0,09

Таблица 4 – Характеристики стокообразующих факторов и среднегодового расхода воды р. Аксу – а. Саркырама и МС Тасарык

Table 4 – Characteristics of runoff factors and the average annual water consumption Aksu River – Sarkyrama village and meteostation Tasaryk

Параметры	№ соответствующего смоделированного гидрографа	Год	Количество годовых осадков, мм	Количество осадков за вег. период, мм	Годовой сток, м <sup>3</sup> /с	Сток за вегетационный период, м <sup>3</sup> /с
Многоводный год	57, 83, 128, 161, 253	2010	<u>818</u>	<u>751</u>	<u>17,9</u>	<u>29,0</u>
Отклонение, %			<b>11,8</b>	<b>5,20</b>	<b>2,00</b>	<b>1,10</b>
Средневодный год	127, 141, 233, 252, 353	1988	<u>656</u>	<u>442</u>	<u>11,2</u>	<u>18,5</u>
Отклонение, %			<b>8,80</b>	<b>8,10</b>	<b>1,30</b>	<b>5,90</b>
Маловодный год	60, 146, 259, 274, 473	1982	<u>708</u>	<u>427</u>	<u>5,83</u>	<u>1,94</u>
Отклонение, %			<b>11,6</b>	<b>10,0</b>	<b>0,20</b>	<b>7,10</b>
<i>Примечание: В числителе приведены фактические данные, в знаменателе – смоделированные значения.</i>						

Как видно из таблицы 4, в створе р. Аксу – а. Саркырама решение задачи проверено на примере данных за 2010 год (многоводный год), 1982 год (маловодный год) и 1988 год (средневодный год). За 2010 г. по значениям фактических данных выбраны пять гидрографов месячного стока с соответствующим номером смоделированного ряда 57, 83, 128, 161, 253. Величина смоделированного годового стока отличается от фактических данных на 2 %, за вегетационный период – на 1,1 %. За 1982 г. по значениям фактические данные годового стока совпадают с моделируемыми данными, а за вегетационный период отличаются на 7,1 %. В средневодный год (1988 г.) по фактическим данным выбраны пять гидрографов месячного стока, величина смоделированного годового стока отличается от фактических данных на 1,3 %, а в вегетационный период – на 5,9 %.

На рисунке 3 изображены смоделированные и наблюдаемые гидрографы месячного стока различных лет водности. Наглядно видно, что в средние по водности годы разница моделированного и наблюдаемого стока составляет не более 2 %, тогда как в многоводные годы эта разница выше, при прогнозировании стока необходимо это учесть.

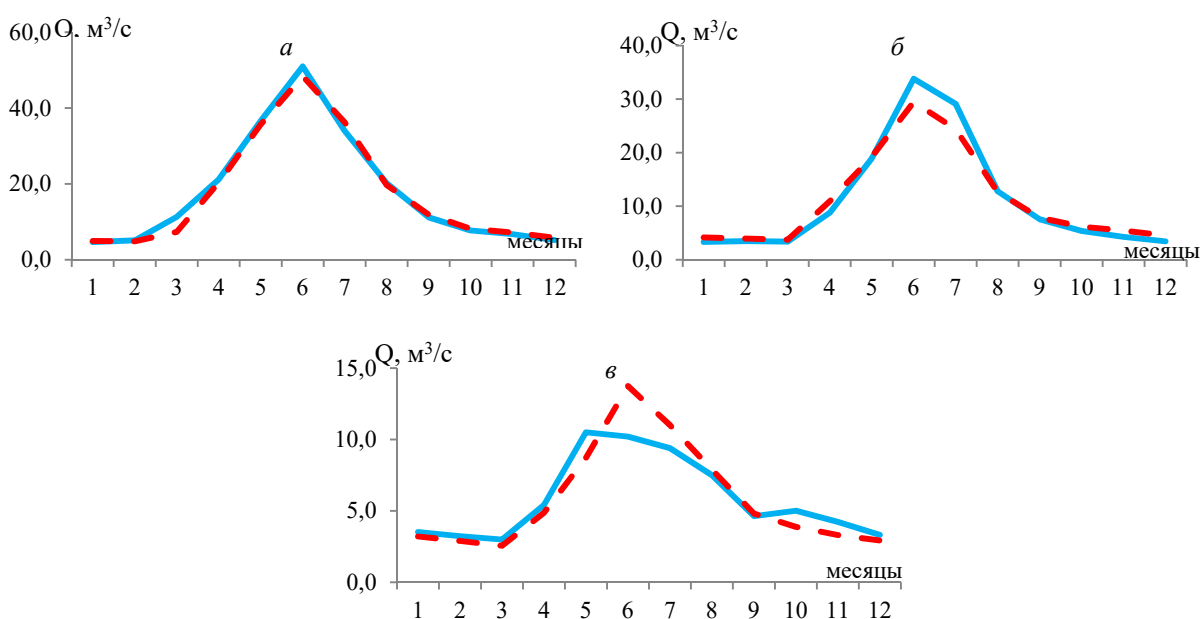


Рисунок 3 – Гидрографы месячного стока р. Аксу – а.Саркырама:  
*a* – многоводный год (2010); *б* – средневодный год (1988); *в* – маловодный год (1982)  
 — наблюдаемые данные; - - - смоделированные данные

Figure 3 – Hydrographs of the monthly runoff of the river Aksu – Sarkyrama village:  
*a* – high-water year (2010); *b* – average year (1988); *c* – dry year (1982)  
 — observed data; - - - forecast data

В целом смоделированные методом канонического разложения ряды стока и осадков имеют параметры, близкие к параметрам фактических данных, и сохраняют авто- и взаимнокорреляционную матрицу, присущую исходным рядам. Следовательно, метод канонического разложения может быть использован для оценки климатически обусловленных изменений речного стока Аксу.

Полученные по модели канонического разложения значения атмосферных осадков используются для составления сценарных прогнозов речного стока. Для этого проводится выборка смоделированных данных осадков, соответствующих данным МОЦАО для трех периодов: 2030, 2040 и 2050 гг. по двум сценариям RCP 4.5 и RCP 8.5. За базовый период принимался 1981-2000 гг. Смоделированный сток, соответствующий выбранной реализации осадков, является прогнозным. По нему построены прогнозные гидрографы (рисунок 4).

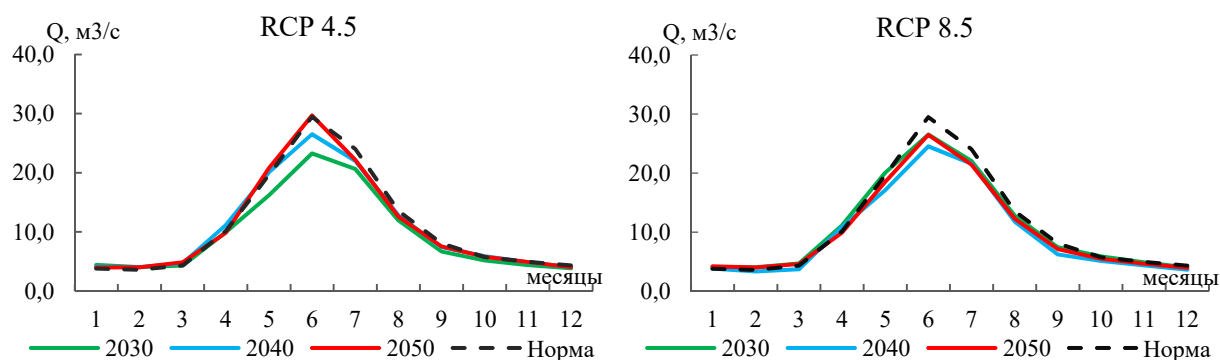


Рисунок 4 – Прогнозные гидрографы стока по методу канонического разложения на перспективу 2030, 2040, 2050 гг.

Figure 4 – Forecast flow hydrographs using the canonical decomposition method for the future 2030, 2040, 2050

В целом по бассейну р. Аксу форма гидрографа на все прогнозируемые годы по различным сценариям остается практически неизменной в осенне-зимние периоды, а в половодье ожидается уменьшение стока и в некоторых случаях смещение его пика на более ранние либо поздние даты. На прогнозных гидрографах можно увидеть срезку пиков половодья и некоторое увеличения стока в холодные месяцы года (таблица 5).

Таблица 5 – Ожидаемые изменения ежемесячных характеристик стока на долгосрочную перспективу

Table 5 – Expected changes in monthly flow characteristics for the long term

Сценарий	Период	Параметры	Месяцы												Год
			I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
RCP 4.5	1974-2019	Q, м <sup>3</sup> /с	3,79	3,60	4,32	10,1	19,7	29,5	24,0	13,6	8,06	5,75	4,94	4,34	11,0
		Отклонение, %													
	2030	Q, м <sup>3</sup> /с	4,41	4,04	4,31	9,97	16,2	23,3	20,7	11,9	6,68	5,18	4,38	3,86	9,57
		Отклонение, %	16	12	0	-2	-18	-21	-14	-12	-17	-10	-12	-11	-13
	2040	Q, м <sup>3</sup> /с	4,11	4,03	4,71	11,2	20,1	26,5	22,0	12,8	7,44	5,89	4,91	4,04	10,6
		Отклонение, %	8	12	9	10	2	-10	-8	-6	-8	3	-1	-7	-3
2050	Q, м <sup>3</sup> /с	3,97	4,00	4,88	9,86	20,8	29,7	22,2	12,6	7,56	5,80	4,92	4,04	10,9	
	Отклонение, %	5	11	13	-3	6	1	-8	-7	-6	1	-1	-7	-1	
RCP 8.5	2030	Q, м <sup>3</sup> /с	4,11	4,03	4,71	11,2	20,1	26,5	22,0	12,8	7,44	5,89	4,91	4,04	10,6
		Отклонение, %	8	12	9	10	2	-10	-8	-6	-8	3	-1	-7	-3
	2040	Q, м <sup>3</sup> /с	3,83	3,32	3,71	10,9	17,1	24,5	21,6	11,8	6,24	5,11	4,35	3,63	9,67
		Отклонение, %	1	-8	-14	7	-13	-17	-10	-13	-23	-11	-12	-16	-12
	2050	Q, м <sup>3</sup> /с	4,19	4,02	4,59	9,91	18,5	26,5	21,4	12,3	7,12	5,49	4,65	3,95	10,2
		Отклонение, %	11	12	6	-2	-6	-10	-11	-10	-12	-4	-6	-9	-7

На р. Аксу – а. Саркырама по сценарию RCP 4.5 к 2030 г. и по сценарию RCP 8.5 к 2040 и 2050 гг. прогнозируются изменение хода годового стока и частичная срезка пика половодья. В вегетационный период уменьшение стока наблюдается по всем прогнозным годам до 11 %, а наибольшее снижение ожидается к 2030 году ( $Q_{1974-2019}=17,5$  м<sup>3</sup>/с,  $Q_{2030}=15,7$  м<sup>3</sup>/с,  $Q_{2040}=16,0$  м<sup>3</sup>/с,  $Q_{2050}=16,5$  м<sup>3</sup>/с).

**Заключение.** Анализ показал, что смоделированные методом канонического разложения ряды стока и осадков имеют параметры, близкие к параметрам фактических данных и сохраняют авто- и взаимнокорреляционную матрицу, присущую исходным рядам. Особенностью модели канонического разложения является градация результатов по водности года, что особенно



актуально при выполнении задач по управлению водным режимом рек. Анализ полученных результатов оценки возможных изменений внутригодового распределения стока на рассматриваемой пункте бассейна р. Арыс показывает изменения месячных значений речного стока как в сторону увеличения, так и уменьшения на все прогнозируемые периоды. По методу канонического разложения изменения речного стока к 2030, 2040, 2050 гг. колеблются около климатической нормы 1974-2019 гг. в сторону как уменьшения (до 23 %), так и увеличения (до 16 %). На прогнозных гидрографах можно увидеть срезку пиков половодья и некоторый рост стока в холодные месяцы года. Таким образом, использование модели канонического разложения на основе зависимости стока от климатических характеристик вполне оправдано полученными результатами, что подтверждается ранее выполненными исследованиями по другим рекам Казахстана [24, 25, 29, 30].

**Финансирование.** Исследование выполнено в рамках проекта «Ледниковые системы трансграничных бассейнов Центральной Азии: состояние, современные и прогнозные изменения, роль в обеспечении водной безопасности стран региона» (ИРН: BR 18574176).

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Пресс-релиз МГЭИК. Широкомасштабное, быстрое и усиливающееся изменение климата [Электрон. ресурс]. – 2021. – URL: [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2021/08/IPCC\\_WGI-AR6-Press-Release\\_ru.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2021/08/IPCC_WGI-AR6-Press-Release_ru.pdf) (дата обращения 21.02.2023).
- [2] State of Global Climate 2021 WMO Provisional report. State of Climate in 2021: Extreme events and major impacts [Электрон. ресурс]. – 2021. – URL: <https://public.wmo.int/en/media/press-release/state-of-climate-2021-extreme-events-and-major-impacts> (дата обращения 21.02.2023).
- [3] UN climate report: It's 'now or never' to limit global warming to 1.5 degrees [Электрон. ресурс]. – 2022. – URL: <https://reliefweb.int/report/world/un-climate-report-it-s-now-or-never-limit-global-warming-15-degrees-enarruzh> (дата обращения 21.02.2023).
- [4] МГЭИК. Изменение климата: Обобщающий доклад. Вклад рабочих групп I, II и III в четвертый доклад об оценке Межправительственной группы экспертов по изменению климата. – Женева: Издательство ВМО, 2007. – 104 с.
- [5] Изменение климата. Обобщающий доклад: Вклад Рабочих групп I, II и III в Пятый оценочный доклад Межправительственной группы экспертов по изменению климата / МГЭИК; под ред. Пачаури Р. К, Мейер Л. А. [и др.]. – Женева, 2014. – 163 с.
- [6] Hofer S. et. al. Greater Greenland Ice Sheet contribution to global sea level rise in CMIP6 // Nature Communications. – 2020.
- [7] Seneviratne S., Hauser M. Regional Climate Sensitivity of Climate Extremes in CMIP6 Versus CMIP5 Multimodel Ensembles // Earth's Future. – 2020. – № 8.
- [8] Долгих С. А., Смирнова Е. Ю., Сабирова А. У. К вопросу о построении сценариев изменения климата // Гидрометеорология и экология. – 2006. – № 1. – С. 7-19.
- [9] Достай Ж. Д., Алимкулов С. К., Сапарова А. А., Мырзахметов А. Б., Баспакова Г. Р. Оценка возобновляемых водных ресурсов казахстанской части бассейна реки Сырдария // Водные ресурсы Центральной Азии и их использование: Матер. междунар. науч.-практ. конф., посвященной подведению итогов объявленного ООН десятилетия «Вода для жизни». – Алматы, 2016. – С. 310-317.
- [10] Говоркова В. А., Катцов В. П., Мелешко В. М. и др. Климат России в XXI веке. Оценка пригодности моделей общей циркуляции атмосферы и океана CMIP3 для расчетов будущих изменений климата России // Метеорология и гидрология. – 2008. – Ч. 2, № 8. – С. 5-19.
- [11] Добровольский С. Г. Глобальная гидрология. Процессы и прогнозы. – М.: ГЕОС, 2017. – 526 с.
- [12] Давлетгалиев С. К., Медеу Н. Н. Сценарные прогнозы ресурсов стока рек Жайык-Каспийского бассейна по отдельным участкам // Вестник КазНУ. – 2017. – № 2(45). – С. 28-40.
- [13] Голубцов В.В. Моделирование стока горных рек в условиях ограниченной информации. – Алматы: Казгидромет, 2010. – 232 с.
- [14] Сапарова А. А., Загидуллина А. Р., Аппазова Т. Б. Современные тенденции изменения речного стока Арало-Сырдаринского водохозяйственного бассейна в изменяющихся климатических условиях // Региональные проблемы водопользования в изменяющихся климатических условиях: Материалы международной научно-практической конференции, 11-12 ноября 2014 г. – Уфа, 2014. – С. 183-188.
- [15] Шульц В. Л. Реки Средней Азии. – Л.: Гидрометеоздат, 1965. – Ч. 1-2. – 691 с.
- [16] Ресурсы поверхностных вод СССР. Средняя Азия. Бассейн р. Сырдарья. – Л.: Гидрометеоздат, 1969. – Т. 14, вып. 1. – 512 с.
- [17] Попова В. П. Прогнозирование водности притоков реки Сырдарья в пределах Республики Казахстан: Дис. ... канд. геогр. наук. – Алматы, 1998. – 148 с.
- [18] Схема комплексного использования и охраны водных ресурсов бассейна р. Сырдарья с притоками. Т. I, кн. 1. Сводная записка. – Алматы, 2008 – 156 с.
- [19] Bergström S., Forsman A. Development of a conceptual deterministic rainfall-runoff model // Hydrology Research. – 1973. – Vol. 4(3). – P. 147-170.
- [20] Горшкова А. Т., Урбанова О. Н., Каримова А. И. Основные этапы моделирования стока рек с площадью водосбора менее 100 000 км<sup>2</sup> // Международный научно-исследовательский журнал. – 2015. – № 8(39). – С. 66-71.

- [21] Костин В. Н., Тишина Н. А. Статистические методы и модели: Учебное пособие. – Оренбург: ОГУ, 2004. – 138 с.
- [22] Давлетгалиев С. К. Групповое моделирование гидрографов месячного стока // Водные ресурсы. – 2013. – № 4. – С. 350-358.
- [23] Пугачёв В. С. Теория случайных функций. – М.: Физматгиз, 1962. – 884 с.
- [24] Вентцель Е. С. Теория вероятностей: Учеб. для вузов. – 6-е изд. стер. – М.: Высш. шк., 1999. – 576 с.
- [25] Бусалаев И. В., Давлетгалиев С. К., Куперман И. Г. Моделирование гидрографа стока методом канонического разложения // Проблемы гидроэнергетики и водного хозяйства. – 1973. – Вып. 10. – С.143–152.
- [26] Бусалаев И. В., Давлетгалиев С. К. Описание речного стока в нескольких створах методом многомерного канонического разложения // Метеорология и гидрология. – 1982. – № 3. – С. 81-87.
- [27] Давлетгалиев С. К. Совместное моделирование рядов годового стока рек методом канонического разложения // Метеорология и гидрология. – 1991. – № 10. – С. 102-108.
- [28] СП 33-101-2003. Определение основных расчетных гидрологических характеристик – М.: Государственный комитет Российской Федерации по строительству и жилищно-коммунальному комплексу, 2004. – 73 с.
- [29] Davletgaliev S. K., Alimkulov S. K., Talipova E. K. The possibility to applying simulated series for compile scenario forecasting river runoff // Environmental Earth Sciences. – 2020. – Vol. 79, issue 16.
- [30] Davletgaliev S. K., Alimkulov S. K., Tursunova A. A., Talipova E. K. Long term forecast of the monthly flow hydrograph of Yertis river (v. Boran) based on combined statistical modeling of the river flow and precipitation // News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of geology and technical sciences. – 2023. – Vol. 6, No. 462. – P. 70-84.

#### REFERENCES

- [1] IPCC press release. Widespread, rapid and intensifying climate change [Electron. resource]. – 2021. – URL: [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2021/08/IPCC\\_WGI-AR6-Press-Release\\_ru.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2021/08/IPCC_WGI-AR6-Press-Release_ru.pdf) (access date 02/21/2023) (in Russ.).
- [2] State of Global Climate 2021 WMO Provisional report. State of Climate in 2021: Extreme events and major impacts [Electron. resource]. – 2021. – URL: <https://public.wmo.int/en/media/press-release/state-of-climate-2021-extreme-events-and-major-impacts> (accessed 02/21/2023).
- [3] UN climate report: It's 'now or never' to limit global warming to 1.5 degrees [Electronic. resource]. – 2022. – URL: <https://reliefweb.int/report/world/un-climate-report-it-s-now-or-never-limit-global-warming-15-degrees-enarruzh> (accessed 21.02. 2023).
- [4] IPCC. Climate Change: Synthesis Report. Contributions of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva: WMO Publishing, 2007. 104 p. (in Russ.).
- [5] Climate change. Synthesis Report: Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / IPCC; edited by Pachauri R. K., Meyer L. A. [et al.]. Geneva, 2014. 163 p. (in Russ.).
- [6] Hofer S. et. al. Greater Greenland Ice Sheet contribution to global sea level rise in CMIP6 // Nature Communications. 2020.
- [7] Seneviratne S., Hauser M. Regional Climate Sensitivity of Climate Extremes in CMIP6 Versus CMIP5 Multimodel Ensembles // Earth's Future. 2020. No. 8.
- [8] Dolgikh S. A., Smirnova E. Yu., Sabirova A. U. On the issue of constructing climate change scenarios // Hydrometeorology and Ecology. 2006. No. 1. P. 7-19 (in Russ.).
- [9] Dostai Zh. D., Alimkulov S. K., Saparova A. A., Myrzakhmetov A. B., Baspakova G. R. Assessment of renewable water resources in the Kazakh part of the Syrdarya river basin // Water resources of Central Asia and their use: Mater. international scientific-practical conf. dedicated to summing up the results of the “Water for Life” decade declared by the UN. Almaty, 2016. P. 310-317 (in Russ.).
- [10] Govorkova V. A., Kattsov V. P., Meleshko V. M. et al. Climate of Russia in the 21st century. Assessing the suitability of the general circulation models of the atmosphere and ocean CMIP3 for calculating future climate changes in Russia // Meteorology and Hydrology. 2008. Part 2, No. 8. P. 5-19 (in Russ.).
- [11] Dobrovolsky S. G. Global hydrology. Processes and forecasts. M.: GEOS, 2017. 526 p. (in Russ.).
- [12] Davletgaliev S. K., Medeu N. N. Scenario forecasts of river flow resources of the Zhayyk–Caspian basin for individual areas // Vestnik KazNU. 2017. No. 2(45). P. 28-40 (in Russ.).
- [13] Golubtsov V. V. Modeling of mountain river flow under conditions of limited information. Almaty: Kazhydromet, 2010. 232 p. (in Russ.).
- [14] Saparova A. A., Zagidullina A. R., Appazova T. B. Current trends in changes in river flow of the Aral-Syr Darya water basin in changing climatic conditions // Regional problems of water use in changing climatic conditions: Materials of the international scientific and practical conference, November 11–12, 2014. Ufa, 2014. P. 183-188. (in Russ.).
- [15] Shultz V. L. Rivers of Central Asia. L.: Gidrometeoizdat, 1965. Part 1-2. 691 p. (in Russ.).
- [16] Surface water resources of the USSR. Middle Asia. Pool river Syrdarya. L.: Gidrometeoizdat, 1969. Vol. 14, issue 1. 512 p. (in Russ.).
- [17] Popova V. P. Forecasting the water content of the tributaries of the Syrdarya River within the Republic of Kazakhstan: Dis. ... PhD geogr. sci. Almaty, 1998. 148 p. (in Russ.).
- [18] Scheme for the integrated use and protection of water resources in the river basin. Syrdarya with its tributaries. Vol. I, book 1. Summary note. Almaty, 2008. 156 p. (in Russ.).
- [19] Bergström S., Forsman A. Development of a conceptual deterministic rainfall-runoff model // Hydrology Research. 1973. Vol. 4(3). P. 147-170.
- [20] Gorshkova A. T., Urbanova O. N., Karimova A. I. Main stages of modeling the flow of rivers with a catchment area of less than 100,000 km<sup>2</sup> // International scientific research journal. 2015. No. 8(39). P. 66-71 (in Russ.).
- [21] Kostin V. N., Tishina N. A. Statistical methods and models: Textbook. Orenburg: OSU, 2004. 138 p. (in Russ.).
- [22] Davletgaliev S. K. Group modeling of monthly runoff hydrographs // Water Resources. 2013. No. 4. P. 350-358 (in Russ.).
- [23] Pugachev V. S. Theory of random functions. M.: Fizmatgiz, 1962. 884 p. (in Russ.).

- [24] Ventzel E. S. Probability theory: Textbook. for universities. 6th ed. revised. M.: Higher. school, 1999. 576 p. (in Russ.).
- [25] Busalaeв I. V., Davletgaliev S. K., Kuperman I. G. Modeling the runoff hydrograph using the canonical decomposition method // Problems of hydropower and water management. 1973. Issue 10. P. 143-152 (in Russ.).
- [26] Busalaeв I. V., Davletgaliev S. K. Description of river flow in several sections using the method of multidimensional canonical decomposition // Meteorology and Hydrology. 1982. No. 3. P. 81–87 (in Russ.).
- [27] Davletgaliev S. K. Joint modeling of annual river runoff series using the canonical decomposition method // Meteorology and Hydrology. 1991. No. 10. P. 102-108 (in Russ.).
- [28] SP 33–101–2003. Determination of the main calculated hydrological characteristics. Moscow: State Committee of the Russian Federation for Construction and Housing and Communal Sector, 2004. 73 p. (in Russ.).
- [29] Davletgaliev S. K., Alimkulov S. K., Talipova E. K. The possibility of applying simulated series for compile scenario forecasting river runoff // Environmental Earth Sciences. 2020. Vol. 79, issue 16.
- [30] Davletgaliev S. K., Alimkulov S. K., Tursunova A. A., Talipova E. K. Long term forecast of the monthly flow hydrograph of the Yertis river (v. Boran) based on combined statistical modeling of the river flow and precipitation // News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of geology and technical sciences. 2023. Vol. 6, No. 462. P. 70-84.

**С. К. Давлетгалиев<sup>1</sup>, А. А. Турсунова<sup>2</sup>, А. Т. Базарбек<sup>\*3</sup>**

<sup>1</sup> Г. ф. д., профессор (әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан; [sdavletgaliev@mail.ru](mailto:sdavletgaliev@mail.ru))

<sup>2</sup> Г. ф. к., қауымдастырылған профессор, Су ресурстары зертханасының басшысы  
(«География және су қауіпсіздігі институты» АҚ, Алматы, Қазақстан; [ais.tursun@bk.ru](mailto:ais.tursun@bk.ru))

<sup>3\*</sup> Кіші ғылыми қызметкер («География және су қауіпсіздігі институты» АҚ,  
Алматы, Қазақстан; [aydanabt@gmail.com](mailto:aydanabt@gmail.com))

### **КАНОНДЫҚ ЖІКТЕУ ӘДІСІМЕН АРЫС ӨЗЕНІ БАССЕЙІНІНІҢ АЙЛЫҚ АҒЫНДЫСЫН БАҒАЛАУ ЖӘНЕ БОЛЖАУ**

**Аннотация.** Жұмыста Арыс өзені бассейнінің су ресурстарын бағалау және болжау үшін ағынды және ағынды қалыптастырушы факторларды бірлескен модельдеу нәтижелерін пайдалану мүмкіндігі қарастырылған. Бұл мәселені шешу үшін канондық жіктеу әдісі қолданылды, ол кездейсоқ процесті (өзен ағындысы) тәуелсіз кездейсоқ шамалар мен кездейсоқ емес функциялардың жиынтығымен сипаттауға мүмкіндік береді. Әдіс сызықтық түрлендірулер класында оңтайлы болып табылады және жіктеу табиғи ортогональды компоненттер бойынша жүзеге асырылады. Арыс өзенінің айлық, жылдық және вегетациялық ағындысы гидрографының болжамдары RCP 4.5 және RCP 8.5 екі сценарий бойынша 2030, 2040 және 2050 жылдарға жасалды. Зерттеу нәтижелері өзен ағындысының 1974–2019 жылдардағы климаттық нормадан 2030, 2040, 2050 жылдарға қарай азаюын және ұлғаюын көрсетті. Өзен ағындысының климаттық сипаттамаларға тәуелділігіне негізделген канондық жіктеу моделін қолдану алынған нәтижелермен негізделген.

**Түйін сөздер:** айлық ағынды, ағынды гидрографы, жауын–шашын, статистикалық модельдеу, канондық жіктеу, ағындыны қалыптастырушы факторлар, метеорологиялық факторлар, өзен ағындысының болжамы.

**S. K. Davletgaliev<sup>1</sup>, A. A. Tursunova<sup>2</sup>, A. T. Bazarbek<sup>\*3</sup>**

<sup>1</sup> Doctor of Geographical Sciences, Professor (al-Farabi Kazakh National University,  
Almaty, Kazakhstan; [sdavletgaliev@mail.ru](mailto:sdavletgaliev@mail.ru))

<sup>2</sup> Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor, Head of the Laboratory of Water Resources  
(JSC «Institute of Geography and Water Security», Almaty, Kazakhstan; [ais.tursun@bk.ru](mailto:ais.tursun@bk.ru))

<sup>3\*</sup> Junior Researcher (JSC «Institute of Geography and Water Security», Almaty, Kazakhstan; [aydanabt@gmail.com](mailto:aydanabt@gmail.com))

### **ASSESSMENT AND FORECAST OF THE MONTHLY RUNOFF OF THE ARYS RIVER BASIN BY THE CANONICAL DECOMPOSITION METHOD**

**Abstract.** The article considers the possibility of using the results of joint modeling of runoff and runoff-forming factors to assess and forecast the water resources in the Arys River basin. To solve this problem, the canonical decomposition method was used, which allows us to characterize a random process (river runoff) by a set of independent random variables and non-random functions. The method is optimal in the class of linear transformations, decomposition was carried out according to natural orthogonal components. Monthly, annual and vegetative hydrograph of the Arys River runoff were predicted for 2030, 2040 and 2050, according to two scenarios, RCP 4.5 and RCP 8.5. The results of the study showed that changes in river runoff by 2030, 2040, and 2050 fluctuate around the climatic norm of 1974–2019, both downwards and upwards. The use of the canonical decomposition model based on the dependence of runoff on climatic characteristics is fully justified by the results obtained.

**Keywords:** monthly runoff, runoff hydrograph, precipitation, statistical modeling, canonical decomposition, runoff-forming factors, meteorological factors, forecast of river runoff.