

ГИДРОХИМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ СОСТАВА ВОДЫ В ТОКТОГУЛЬСКОМ ВОДОХРАНИЛИЩЕ

*Толстихин Г.М.¹, Токарев И.В.², Шило В.Н.¹,
Самсонова А. А.¹, Жакеев Б.М.¹*

*1-Институт водных проблем и гидроэнергетики НАН Кыргызской Республики
2-Санкт-Петербургское отделение Института геоэкологии РАН*

Формирование водного объёма Токтогульского водохранилища происходит в основном за счёт речного стока р. Нарын и рек, формирующихся на площади Кетмень–Тюбинской впадины.

В северной, более увлажнённой части впадины, правые притоки р. Нарын, такие как реки Узун-Ахмат, Чычкан, Торкент, Толук, характеризуются значительной длиной и многоводностью. Их истоки большей частью лежат выше снеговой линии, а основные водосборные площади расположены на отметках 1500-3500 м (Токарев и др., настоящий сборник, Толстихин и др., настоящий сборник). В режиме названных рек начало половодья отмечается в апреле-мае, когда в горах тают сезонные снега, а в июне, согласно общепринятой точке зрения, наблюдается пик, связанный с таянием высокогорного снега. Среднемесячные и среднегодовые значения величины речного стока основных рек приведены в Табл. 1.

Южная (левобережная) часть района имеет слаборазвитую речную сеть. Здесь наиболее крупными притоками р. Нарын являются реки Каинды и Саргата, истоки которых находятся на северных сухих склонах Тахталыкской гряды. С западного же её проявления – гор Кочкор-Тюбе не стекает ни одного постоянного водотока.

Табл. 1.

Среднемесячный и среднегодовой речной сток в пределах Кетмень–Тюбинской впадины по многолетним данным, м³/с (Государственный... 1985; Ресурсы... 1969; Ресурсы... 1967).

Река	Месяц												Среднее за год
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
Узун–Ахмат	9.96	9.06	9.32	23.9	60	78.8	57.8	33	20	15.2	13.3	11.4	28.6
Чычкан	5.49	4.98	4.9	10.5	31.7	56.8	43.6	22.2	11.1	7.8	6.55	5.82	17.6
Торкент	3.11	3.11	3.28	8.49	22.2	38.1	23.1	8.67	4.41	4.1	3.83	3.32	10.3
Нарын	136	136	152	261	511	819	711	504	286	207	175	147	324

Как видно из Табл. 1, Рис. 1. около 85 % питания Токтогульского водохранилища происходит за счёт стока р. Нарын. Наибольшее половодье р. Нарын наблюдается в июне-июле с расходом воды до 800–1000 м³/с, поэтому р. Нарын играет решающую роль в формировании химического состава воды Токтогульского водохранилища.

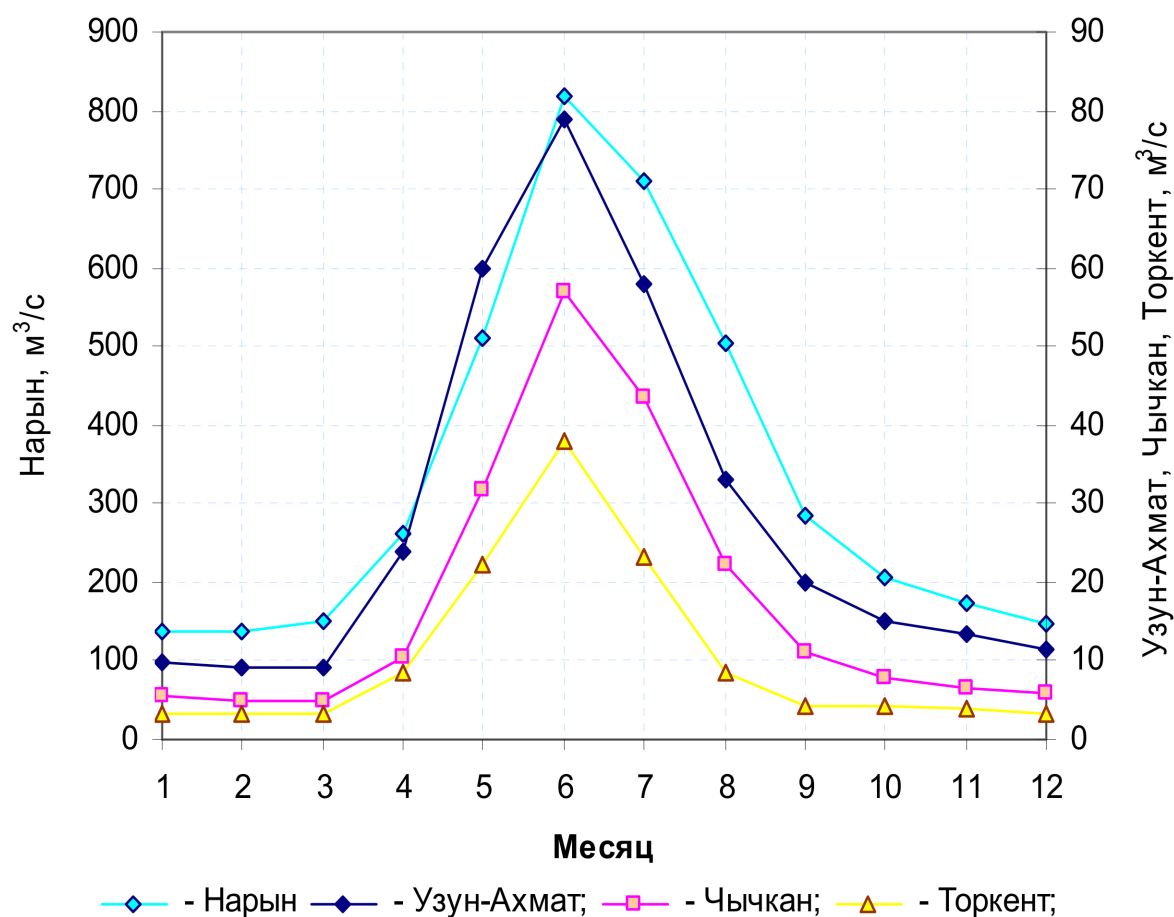


Рис.1. Совмещенный гидрограф стока рек частного Токтогульского бассейна.

В течение последних десятилетий прошлого века в нижнем течении р. Нарын был построен каскад гидроэлектростанций - Токтогульская, Курпсайская, Ташкумырская и Шамалдысайская. Самая крупная Токтогульская ГЭС имеет водохранилище энергетическо - ирригационного назначения, с многолетним регулированием стока. Остальные водохранилища имеют энергетическое назначение.

Строительство водохранилищ, обеспечивающих сезонное и многолетнее регулирование стока, неизбежно сопровождается изменением химического состава воды в нижнем бьефе по сравнению с составом воды входного створа. В общем случае к числу факторов, влияющих на изменение химического состава, относятся (Аввакян и др., 1994):

- испарение с поверхности водоемов,
- переработка берегов и связанный с нею вынос минеральных солей,
- интенсификация биохимических процессов в связи с изменением гидрологического режима,
- рост загрязнения среды, обусловленный хозяйственным освоением акватории и береговой зоны водохранилища.

Ниже приведены результаты гидрохимических анализов по трем гидропостам за 1954 г. до заполнения водохранилища (Табл. 2).

Табл. 2.

Макрокомпонентный состав воды в реке Нарын до затопления Токтогульского водохранилища.

Гидропосты и даты отбора проб	Нарын		с. Алексеевка (старый пос. Токтогул)		Уч-Курган	
	4.06.1954 г.		18.05.1954 г.		18.06.1954 г.	
Содержание компонентов	мг/л	% - экв.	мг/л	% - экв.	мг/л	%- экв.
Катионы:						
$\text{Na}^+ + \text{K}^+$	16.5	23	19.0	18	12.8	14
Mg^{2+}	7.8	22	21.3	42	11.2	26
Ca^{2+}	32.2	55	34.1	40	42.1	60
Анионы:						
Cl^-	5.1	5	14.3	10	9.8	8
SO_4^{2-}	18.3	13	41.1	20	47.7	28
HCO_3^-	146.5	82	180.1	70	135.5	64
Расчетная минерализация	153.0		219.6		198.3	

Данные Табл. 2 показывают, что от гидропоста «Нарын» ниже по течению р. Нарын природный (вне антропогенного влияния) состав воды существенно меняется, но эти изменения не строго пропорциональны пройденному пути. Гидропост «Нарын» расположен в 530 км от устья, «Алексеевка» (затопленный старый п. Токтогул) в 150 км, «Уч-Курган» в 45 км. Однако, минерализация воды на последнем заметно ниже, чем на вышерасположенном по течению гидропосту «Алексеевка». Это, очевидно, связано с разбавляющим действием воды притоков р. Карасу и других, впадающих в р. Нарын на участке между этими гидропостами.

При среднемноголетнем расходе реки Нарын $324 \text{ м}^3/\text{с}$, при отсутствии сброса на затопление чаши Токтогульского водохранилища до НПУ (нормально - подпертого уровня) потребовалось около полутора лет 1973 и 1974 гг. В этот период изменился гидрологический режим реки ниже по течению, в том числе за счет появления новых факторов формирования химического состава воды в водохранилище (*Отчет...*, 1979).

Принятый при строительстве Токтогульского водохранилища прогноз изменения состава воды в р. Нарын не известен. Прогноз, выполненный в процессе инженерно-геологических изысканий чаши водохранилища, допускал рост минерализации воды на одну треть – до $0,47 \text{ г/дм}^3$, за счёт роста антропогенного загрязнения и интенсификации сельского хозяйства в прибрежной зоне (Плешков и др., 1979).

Рассматривая вопрос об изменениях состава воды р. Нарын под влиянием Токтогульской ГЭС, используем материалы по гидропосту в г. Нарын, непрерывно

действующем более полувека. Через этот участок проходит около 30 % среднегодового стока р. Нарын, в Табл. 3 и Рис. 2 сравниваются данные «Киргизгидромета» за период 1951-1955 гг. (Казиев и др., 1964) и 1987-1990 гг.

Табл. 3.

Макрокомпонентный состав воды в р. Нарын по гидропосту «Нарын» в разные по водности годы (по данным «Киргизгидромета»).

Гидрологи- ческая фаза	Содержание компонентов												Сухой остаток , мг/дм ³
	Na ⁺ + K ⁺		Mg ²⁺		Ca ²⁺		Cl ⁻		SO ₄ ²⁻		HCO ₃ ⁻		
	мг/л	%- экв.	мг/л	%- экв.	мг/л	%- экв.	мг/ л	%- экв.	мг/л	%- экв.	мг/л	%- экв.	
	Период 1951-1955 гг.												
Половодье	14.5	23.3	6.4	19.6	30.8	57.1	5.9	6.3	24.2	18.5	124.0	75.2	143.5
	Период 1987-1990 гг.												
Межень	25.2	24.8	14.0	26.4	43.2	48.8	9.4	5.9	48.1	22.6	194.2	71.5	237.0
Половодье	14.3	22.6	7.9	24.2	29.3	53.2	6.1	6.3	31.6	24.1	115.8	69.6	146.1
Средний многолет- ний состав	17.1	23.4	8.6	22.5	34.8	54.1	8.3	11.3	36.8	24.0	125.8	64.7	168.5

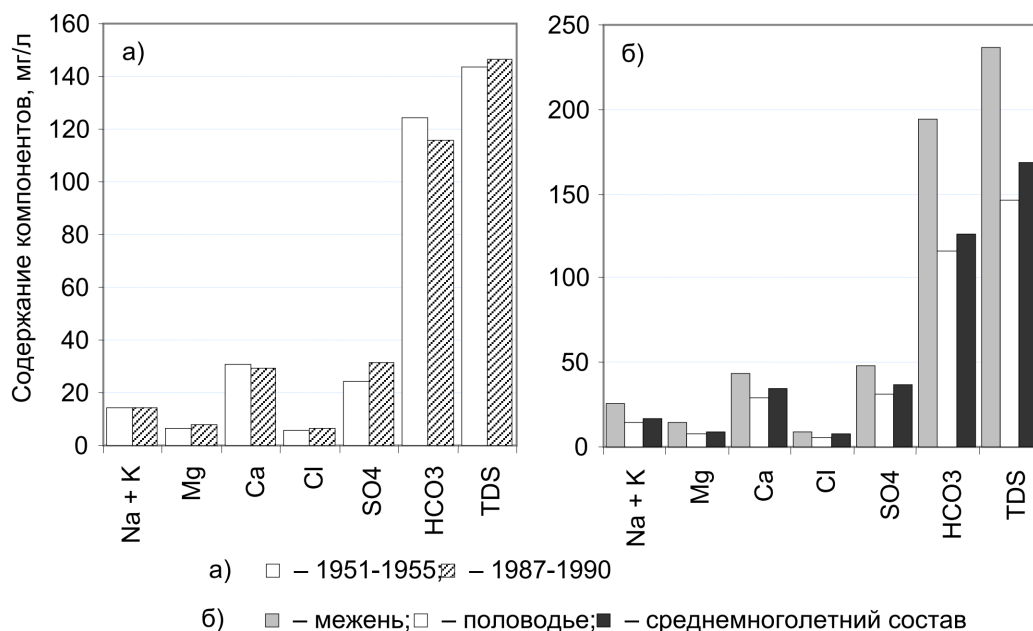


Рис. 2. Сравнение макрокомпонентного состава воды в р. Нарын по гидропосту «Нарын» в разные по водности годы (периоды 1951-1955 и 1987-1990 гг.) и в разные гидрологические фазы периода 1987-1990 гг. (по данным Киргизгидромета).

Сравнивая два периода половодья за разные годы, можно сделать вывод, что по величине минерализации, содержанию натрия + калия, хлора различия не выходят за пределы 1-3 %. Разница в концентрациях сульфатов (23 %), магния (19 %), гидрокарбоната (7 %), кальция (5 %), на наш взгляд, в основном, обусловлена различиями в методике анализов водных проб, используемых за последние 40-50 лет. Имеющиеся данные позволяют утверждать, что под влиянием природных факторов состав воды р. Нарын за последние 40-50 лет (в верхней части бассейна р. Нарын) практически не изменился. Выявленные изменения химического состава в средней части бассейна р. Нарын, после строительства Нижне-Нарынского каскада ГЭС, следует отнести к числу следствий гидротехнического строительства.

Для оценки влияния Токтогульского водохранилища на изменение состава воды в р. Нарын по течению были взяты два створа, организованные после строительства Токтогульской ГЭС – входной в Токтогульское водохранилище «Уч-Терек» и ниже Курпайской ГЭС «Ташкумыр-верхний» (устье р. Карасу- правая) В Табл. 4 приведено сравнение макрокомпонентного состава воды по этим двум створам в один из многоводных годов после строительства водохранилища.

Таблица 4. Сравнительная характеристика воды р. Нарын по гидропостам «Уч-Терек» и «Ташкумыр-верхний» за 1987 г.

Показатели состава	Уч-Терек*	Ташкумыр-верхний	Характер изменения средних показателей, %
pH	$\frac{7.20-8.12}{7.67}$	$\frac{7.42-8.02}{7.85}$	+2.7
Содержание компонентов, мг/л			
Cl ⁻	$\frac{7.1-41.8}{18.2}$	$\frac{5.13-17.7}{12.2}$	-32
SO ₄ ²⁻	$\frac{30.3-92.2}{48.3}$	$\frac{26.9-72.0}{43.0}$	-11
Mg ²⁺	$\frac{6.1-18.5}{12.0}$	$\frac{10.6-20.3}{12.5}$	+4.1
Ca ²⁺	$\frac{29.6-63.1}{44.1}$	$\frac{20.0-48.1}{39.6}$	-26
Сухой остаток	$\frac{130-328}{215}$	$\frac{136-239}{219}$	+2
Расход р. Нарын, м ³ /с	<u>479.61</u>		

* – в числителе псевдодробь приведены пределы изменения показателей, а в знаменателе – среднее за год.

Как следует из Табл. 4, на участке между выбранными створами наиболее существенно снижается содержание хлора. Это объясняется увеличением разбавляющей роли боковых притоков р. Нарын, формирующихся на территории, сложенной магматическими породами, бедными хлоридными соединениями и растворами, а также хорошо промытыми осадочными породами палеозоя и метаморфическими образованиями допалеозойского и палеозойского возраста.

В целом, в настоящее время можно достаточно уверенно считать, что в условиях стационарного гидрологического режима Токтогульского и Курпсайского водохранилищ существенных изменений макрокомпонентного состава воды в р. Нарын не происходит, что в свою очередь не сказывается на качестве воды, выпускаемой из Токтогульского водохранилища. Данные гидрохимических исследований за 2007-2009 гг. по гидропосту «Уч-Терек» подтверждают этот вывод (Табл. 5, 5а, 6).

Табл. 5. Химический состав поверхностных вод р. Нарын по гидропосту «Уч-Терек» в период 2007-2009 гг.

Дата отбора проб	Расход р. Нарын, м ³ /с	Химический состав воды, мг/л											
		Минерализация	Общая жёсткость	pH	Окисляемость	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻
20.08.07	426.00	334	3.5	7.8	0.16	48	13	16	1.8	18	64.6	134	3
27.08.07	303.00	315	3.3	8	1.52	44	13	15	1.8	16	65	122	4
03.09.07	303.00	321	3.3	8	0.56	44	13	15.4	1.8	18	65.8	125	4
10.09.07	303.00	334	3.5	7.8	1.36	47	14	16	1.8	16	63.8	140	1
17.09.07	303.00	367	3.8	7.8	1.04	54	13	15.6	1.8	7	10.3	126	1
24.09.07	209.00	329	3.3	7.9	0.24	58	12	16	1.8	18	62.6	134	3
19.04.08	198.00	379	4.4	7.9	0.56	58	18	29.6	2.4	37	97.5	168	2.7
27.09.09	250.00	375	3.8	7.6	0.48	61	9	21	2.1	16	67.9	171	3.5

Табл. 5а. Сравнительная характеристика некоторых макрокомпонентов химического состава воды р. Нарын в створе гидропоста «Уч-Терек» за 1954–2009 гг.

Макрокомпоненты	Годы наблюдений							
	1954	1987	1990	1991	1992	2007	2008	2009
pH	7.7	7.7	7.6			7.8	7.9	7.6
Ca ²⁺	34.1	44.1	39.7	38.5	44.0	47.0	58.0	61
Mg ²⁺	21.3	12.0	11.4	13.6	17.2	14.0	18.0	9.0
Cl ⁻	14.3	18.2				16.0	37.0	16
SO ₄ ²⁻	41.1	48.1	52.2	64.9	72.4	63.8	97.0	67.9
Расход р. Нарын, м ³ /с	465.15	479.61	414.73	339.29	382.64	312.00	289.00	

Табл. 6. Сравнительная характеристика некоторых макрокомпонентов химического состава воды р. Нарын в створе гидропоста «Уч-Терек» и в верхнем и нижнем бьефах Токтогульской и Курпсайской плотин за 2007–2009 гг.

Место отбора	Время отбора	Ca ²⁺ , мг/л	Mg ²⁺ , мг/л	Na ⁺ , мг/л	Cl ⁻ , мг/л	SO ₄ ²⁻ , мг/л	HCO ₃ ⁻ , мг/л	Общая жесткость
Р. Нарын, гидропост «Уч-Терек»	Осень 2007	58.0	12.0		18.0	62.6	134.0	3.3
	Весна 2008	58.0	18.0	29.6	37.0	97.53	168.0	
	Весна 2009	53.0	15.0	20.0	26.0	73.25	149.0	3.85
	Осень 2009	61.0	9.0	21.0	16.0	67.9	171.0	2.8
	<i>Среднее</i>	<i>57.5</i>	<i>13.5</i>	<i>23.5</i>	<i>24.3</i>	<i>75.3</i>	<i>156</i>	<i>3.3</i>
ВБ Токтогульской плотины*	Осень 2007	39.1	12.8	0.46	5.0	51.85	101.3	1.5
	Весна 2008	53.1	10.94	3.45	11.94	65.43	122.0	3.2
	Весна 2009	64.13	9.73	1.13	5.6	71.6	141.5	4.0
	Осень 2009	61.0	9.0	21.0	16.0	67.9	171.0	2.8
	<i>Среднее</i>	<i>54.3</i>	<i>10.6</i>	<i>6.5</i>	<i>9.6</i>	<i>64.2</i>	<i>134</i>	<i>2.9</i>
НБ Токтогульской плотины*	Осень 2007	54.1	3.65	13.1	6.67	58.8	1.128	1.3
	Весна 2008	60.12	2.43	18.63	13.55	76.95	120.8	3.55
	Весна 2009	52.1	23.1	7.98	10.38	83.12	170.8	4.5
	Осень 2009	44.89	15.56	13.36	12.07	64.61	107.36	2.1
	<i>Среднее</i>	<i>52.8</i>	<i>11.2</i>	<i>13.3</i>	<i>10.7</i>	<i>70.9</i>	<i>100</i>	<i>2.9</i>
ВБ Курпсайской плотины*	Осень 2007	44.1	13.62	0.39	10.0	49.5	115.9	3.32
	Весна 2008	48.09	10.9	11.67	8.07	49.4	158.6	3.3
	Весна 2009	45.09	14.2	30.64	7.34	82.3	164.7	3.42
	Осень 2009	38.08	21.89	0.9	6.67	51.4	148.8	3.7
	<i>Среднее</i>	<i>43.8</i>	<i>15.2</i>	<i>10.9</i>	<i>8.0</i>	<i>58.2</i>	<i>147</i>	<i>3.4</i>
НБ Курпсайской плотины*	Осень 2007	48.1	8.76	1.89	8.34	50.6	109.8	3.12
	Весна 2008	18.1	10.94	7.36	11.3	72.0	109.8	3.3
	Весна 2009	50.0	15.8	18.1	5.47	79.4	158.6	3.8
	Осень 2009	44.09	12.16	13.59	8.67	45.7	152.5	3.2
	<i>Среднее</i>	<i>40.1</i>	<i>11.9</i>	<i>10.2</i>	<i>8.4</i>	<i>61.9</i>	<i>133</i>	<i>3.4</i>

* - Анализы выполнены в Лаборатории натуральных наблюдений Каскада Токтогульских ГЭС.
Табл. 6. Сравнительная характеристика некоторых макрокомпонентов химического состава воды р. Нарын в створе гидропоста «Уч-Терек» за 1954–2009 гг.

Определенное влияние на химический состав воды в Токтогульском водохранилище оказывают процессы переработки берегов. В зону затопления Токтогульского водохранилища попали горизонты эвапоритов, содержащих галит (NaCl), мирабилит ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$), тенардита (Na_2SO_4) и астраханита ($\text{MgNa}_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 4 \text{H}_2\text{O}$) (Казиев и др., 1964; Ковалев, 1972, 1985). Месторождение каменных солей Шамшыкалата, расположенное в средней, правобережной части акватории водохранилища в настоящее время разрабатывается.

Важным наблюдением, полученным в ходе проекта, является обнаружение высокой солености временных водотоков, стекающих с гор Шамшыкалата (Рис. 4) в Токтогульское водохранилище в период выпадения зимних дождей (Табл. 7). Минерализация временных водотоков, протекающих в ущелье р. Тоскол и в ущелье Чон-Кен достигает $M \approx 267\text{-}302 \text{ г/дм}^3$.



Рис. 3. Соленая гора Шамшыкалата на северо-западе Токтогульского водохранилища.

Табл. 7.

Результаты гидрохимических анализов поверхностных вод в районе месторождения каменных солей Шамшыкалата. Ноябрь 2009 г. (мг/дм³)

Место отбора	K	Ca	Mg	Cl	SO ₄	NO ₃ -N	Fe	Mn	F	Сухой остаток
Устье временного ручья в ущелье Чон-Кен	235	280.6	2364	177250	15500	55	<0.3	0.54	0.12	300290
Подземные воды из шурфа глубиной 1,2 м, расположенного в 10 м от уреза воды в водохранилище	18.3	340.7	627.1	28360	12000	40	0.04	0.7	1.1	38230
Вода из временного ручья в 1 км от устья в ущелье Чон-Кен	225	320.6	2822	163956	17000	90	<0.3	0.43	0.2	301740
Вода из временного ручья в 0,5 км от устья в ущелье Чон-Кен	215	300.6	2533	159525	19000	45	<0.3	0.44	0.11	298850
Правый приток р. Тоскол	185	460.9	3678	132938	24300	70	<0.3	0.22	0.27	267000
р Тоскол	< 0.5	60.1	20.5	24.8	96	4.7	0.04	0.02	0.32	390
Левый приток р. Тоскол	< 0.5	80.2	4.8	60.3	225	4.1	0.03	0.197	0.51	714

Анализировалось геологическое описание отложений, слагающих горы. Последнее указывает на то, что основная доля геологических формаций здесь представлена глинистыми разностями пород с низкой гидравлической проницаемостью. Выходы каменной соли на поверхности отмечаются на относительно небольших площадях, в основном в карьере на

участках ее добычи. Несмотря на это, выполненный анализ позволяет предположить, что основной смыв легко растворимых соединений происходит практически на всей площади водосбора непосредственно с поверхности почвы за счет растворения корок и выпотов соли. Накопление соли в приповерхностной части разреза, по-видимому, обусловлено выпариванием воды в сухой сезон при подтягивании капиллярной влаги к поверхности испарения.

Для оценки баланса поступления соли с поверхности водосбора в Токтогульское водохранилище были использованы экспериментальные данные по солености воды, стекающей с гор Шамшыкалата. Был рассчитан возможный прирост минерализации воды в водохранилище.

Балансовая модель атмосферные осадки – испарение – сток, предложенная В.А. Кузьмиченком, дает для района гор Шамшыкалата величину слоя стока порядка $\varepsilon = 50\text{--}100$ мм/год. Площадь водосбора временных водотоков, протекающих в ущелье р. Тоскол и в ущелье Чон-Кен, с которого происходит смыв соли, составляет около $S = 11.5$ км². Средняя минерализация временных водотоков, исходя из данных в Табл. 7, составляет 292 г/дм³. Суммарный среднеголетний сток рек, впадающих в водохранилище, составляет около 12×10^9 м³/год. Объем воды в водохранилище для разных положений уровня воды может быть определен, исходя из зависимости, рассчитанной В.А. Кузьмиченком. Результаты расчета прироста солености представлены в Табл. 8.

Табл. 8.

Результаты расчета возможного прироста минерализации воды в Токтогульском водохранилище за счет смыва солей с водосборов временных водотоков, протекающих в ущелье р. Тоскол и в ущелье Чон-Кен (горы Шамшыкалата) по экспериментальным данным.

Суммарная площадь водосбора временных водотоков в бассейне р. Тоскол и в ущелье Чон-Кен, м ²	11500000			
Средняя соленость временных водотоков в ущелье р. Тоскол и в ущелье Чон-Кен, кг/м ³	292			
Слой стока, мм/год	0.05	0.1		
Объем стока с поверхности водосбора ущелья р. Тоскол и ущелья Чон-Кен, м ³ /год	575000	1150000		
Вынос соли стоком, кг/год	167900000	335800000		
Среднегоголетние расходы рек, м ³ /с	Нарын	Узун-Ахмат	Чыч кан	Торкент
	324	28.6	17.6	10.3
Суммарный среднегоголетний расход рек, м ³ /с	380.5			
Суммарный среднегоголетний объем стока в водохранилище, м ³ /год	11967912000			
Отметка зеркала воды в водохранилище, м	850 м	900 м		
Объем воды в водохранилище, м ³	771500000	1954800000		
Время водообмена воды в водохранилище, лет	0.64	1.63		
Прирост солености воды в водохранилище без учета притока по рекам, кг/м ³	0.022	0.017		
Прирост солености воды в водохранилище с учетом притока по рекам, кг/м ³	0.009	0.011		

Таким образом, согласно расчетам (Табл. 8), возможный прирост минерализации воды в водохранилище за счет смыва солей с поверхности водосборов в горах Шамшыкалата оказывается на уровне около 10-20 мг/дм³.

Учитывая большую плотность соленой воды, поступающей с гор Шамшыкалата по временным водотокам, она должна «тонуть» сразу же после поступления в водохранилище, формируя «линзу» воды в его придонной части. По данным рейсов 2007-2008 гг. объем этой «линзы» как минимум в 3 раза меньше объема всего водохранилища. Поэтому минерализация воды в этой «линзе» должна быть на 30-60 мг/дм³ больше, чем в целом по водохранилищу. Последнее подтверждается экспериментально обнаруженным повышением солёности воды в глубоких частях водохранилища во время исследований 2007-2008 гг., когда наблюдался не слишком низкий уровень воды в водохранилище.

Поскольку за зиму 2008-2009 гг. из водохранилища был выпущен большой объем воды, то время водообмена значительно уменьшилось. Ориентировочная оценка показывает, что при наблюдаемом в настоящее время уровне воды в водохранилище период водообмена в нем составляет около полугода (Табл. 8). Этот период существенно меньше промежутка между двумя дождливыми сезонами, которые наступают зимой один раз в году. Соответственно, весь объем воды с ранее поступившими в зиму 2008-2009 г. солями был выпущен из водохранилища, а линза более соленых вод должна была исчезнуть. Это подтверждается данными измерений, выполненных в ходе рейса 6-9 октября 2009 г. (Рис. 4).

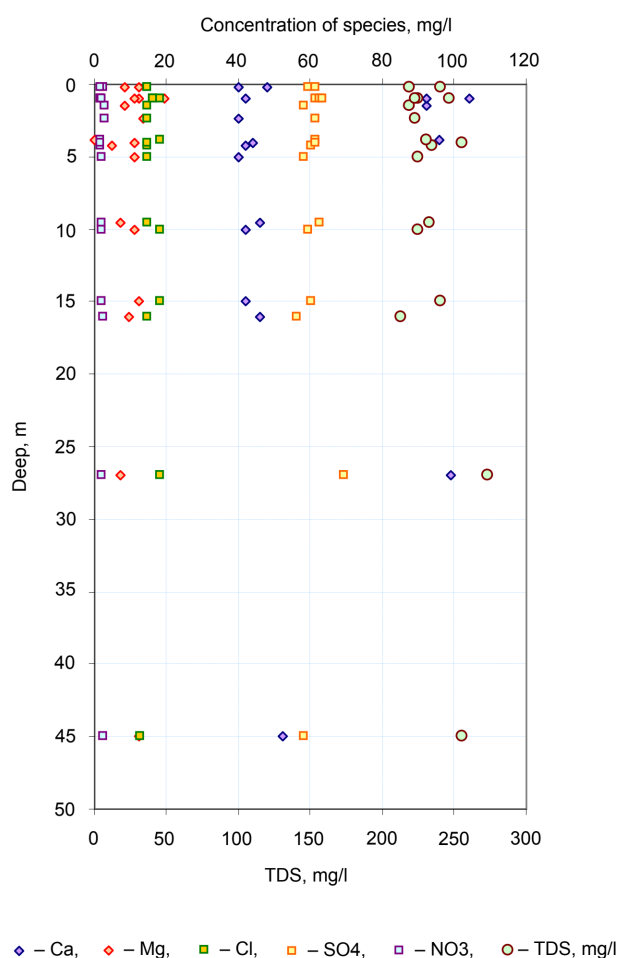


Рис. 4. Распределение суммарной минерализации и содержания отдельных компонентов по глубине водохранилища в период рейса 6-9 октября 2009 г.

В дополнение к выполненному расчету изменения минерализации воды в водохранилище следует сделать дополнительное замечание. В придонной части водохранилища прирост минерализации, по-видимому, будет несколько большим, чем 30-60 мг/л, так как приведенные выше расчеты не учитывают притока подземных вод.

Поступления соли в водохранилище с подземными водами возможно на участке примыкания гор Шамшыкалата к водохранилищу. Однако, горы Шамшыкалата характеризуются преимущественно глинистым геологическим разрезом, а также малым объемом атмосферных осадков. В совокупности эти два обстоятельства препятствуют формированию существенного стока подземных вод с данной площади.

Дополнительное поступление соли в водохранилище с подземными водами должно наблюдаться в долине р. Узун-Ахмат. Например, в скважине в с. Чон-Арык выявлена повышенная минерализация подземных вод $M = 1-4 \text{ г/дм}^3$ (Табл. 9), которая отмечалась здесь и ранее (Раманкулов и др., 1972, Чепков и др., 1988). Одновременно здесь отмечаются относительно хорошая проницаемость пород $k_f = 0.3-0.5 \text{ м/сут}$, что создает благоприятные условия для стока соленых подземных вод в водохранилище.

Табл. 9.

Результаты химического анализа подземных вод, мг/л.

Место отбора пробы	Дата отбора пробы	Минерализация, г/л	Ca	Mg	Na	Cl	SO ⁴	HCO ³
Скважина в с. Чон-Арык	25.10.1986	946	78	57	220	72	266	42
	18.04.2008	1774	109	78	310	525	397	156
	26.09.2009	1298	103	73	203	533	96	146
Родник Долон-Булак	15.04.2008	1231	152	26	135	69	491	226
Родник Кара-Булак	19.04.2008	515	78	19	16	12	87	244
	28.04.2009	490	81	17	15	10	77	247
Скважина в с. Кётёрме	30.08.1969	410	52	8	44	18	61	177
	19.04.2008	476	44	9	62	21	103	174
	28.09.2009	458	41	9	68	21	98	171
Родник Торкент	17.04.2008	472	70	13	27	25	49	241
	28.09.2009	375	63	10	17	22	32	196
Родник в с. Кара-Жыгач	18.04.2008	301	52	7	9	5	20	174
	28.09.2009	280	52	7	6	7	20	165
	02.11.2009	222	38	12	-	4	8	144
Родник «Нарынгэсстрой»	16.04.2008	1220	152	26	134	69	485	223
	27.09.2009	1234	152	25	48	60	478	268

Рассмотрим взаимосвязи между отдельными компонентами состава по результатам опробования подземных вод. Результаты парного корреляционного анализа данных из Табл. 7 и 9 с учетом химических анализов воды в водохранилище приведены в Табл. 10. Поскольку размах вариаций в содержаниях компонентов весьма велик, то все измеренные показатели статистически высоко связаны между собой. В данном случае эти связи следует признать фиктивными, на что указывает рассмотрение графиков рассеяния, построенных для всех пар измеренных параметров (Рис. 5).

Таблица 10.

Парный корреляционный анализ результатов определения химического состава проб подземных вод.

	Ca	Mg	Cl	SO4	NO3	TDS
Ca	1					
Mg	0,91	1				
Cl	0,85	0,96	1			
SO4	0,96	0,98	0,93	1		
NO3	0,92	0,95	0,93	0,95	1	
TDS	0,85	0,97	1,00	0,94	0,93	1

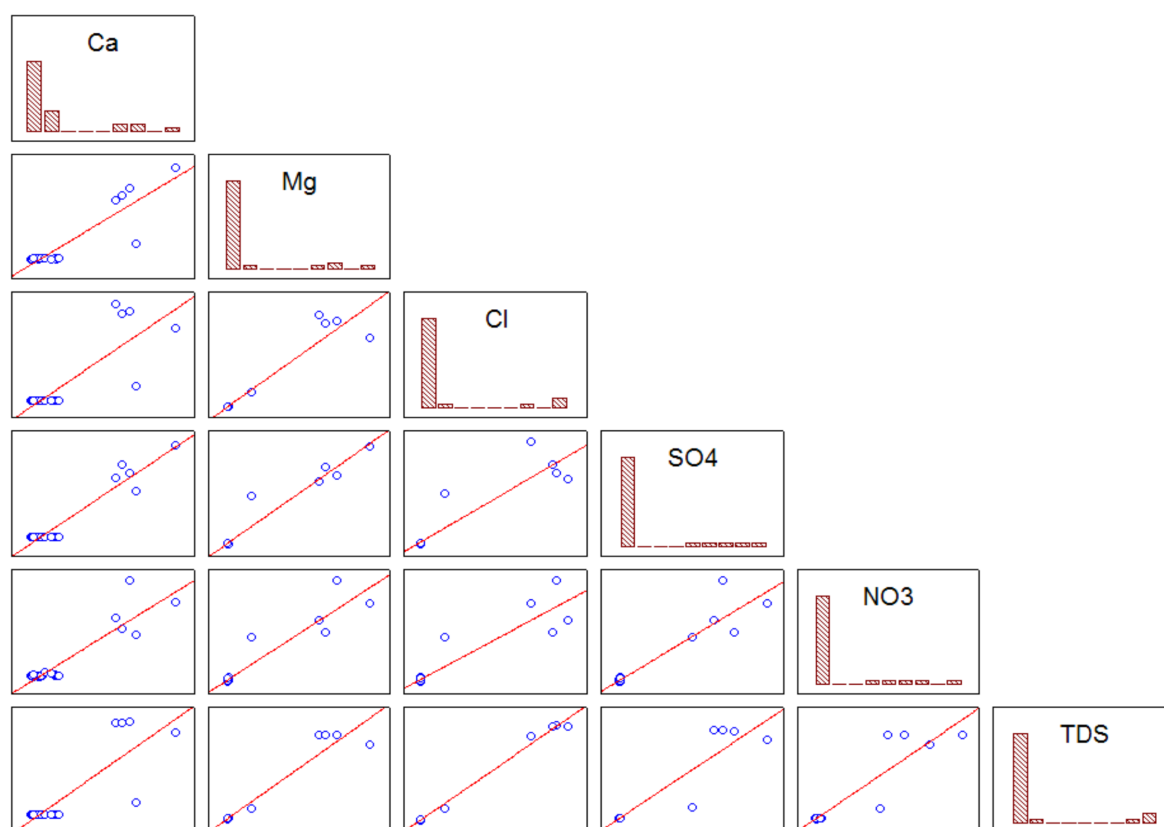


Рис. 5. Графики рассеяния по результатам определения химического состава подземных вод.

Далее для правильной интерпретации полученных данных в расчет статистических связей были взяты только пробы с малыми суммарными концентрациями компонентов $\text{TDS} < 1$ г/л. Результаты парного корреляционного анализа для этой выборки данных приведены в Табл. 11. Для исследованной выборки значимым является коэффициент парной корреляции $r = 0,37$ на доверительном уровне $p < 0,05$.

Из Табл. 11 видно, что наибольшей статистически тесной корреляцией связаны пары хлориды-сульфаты $r_{\text{Cl-SO}_4} = 0,98$, TDS-хлориды $r_{\text{TDS-Cl}} = 0,97$, TDS-сульфаты $r_{\text{TDS-SO}_4} = 0,98$. Такая тесная связь обусловлена тем, что эти компоненты химического состава формируются преимущественно за счет одного механизма, по-видимому, за счет смыва легкорастворимых солей атмосферными осадками. В результате эти пары не могут быть использованы для

генетической интерпретации вклада от других источников формирования химического состава.

Табл. 11.

Парный корреляционный анализ результатов определения химического состава для проб подземных вод для выборки с условием $TDS < 1$ г/дм³.

	Ca	Mg	Cl	SO4	NO3	TDS
Ca	<i>1</i>					
Mg	0,12*	<i>1</i>				
Cl	0,49	0,09	<i>1</i>			
SO4	0,51	0,14	0,98	<i>1</i>		
NO3	0,15	0,36	0,54	0,58	<i>1</i>	
TDS	0,48	0,20	0,97	0,98	0,63	<i>1</i>

* – значимый коэффициент парной корреляции $r = 0,37$ на уровне $p < 0,05$

Графики рассеяния для выборки химических анализов подземных вод с условием $TDS < 1$ г/л, построенные для всех пар измеренных параметров, приведены на Рис. 6.

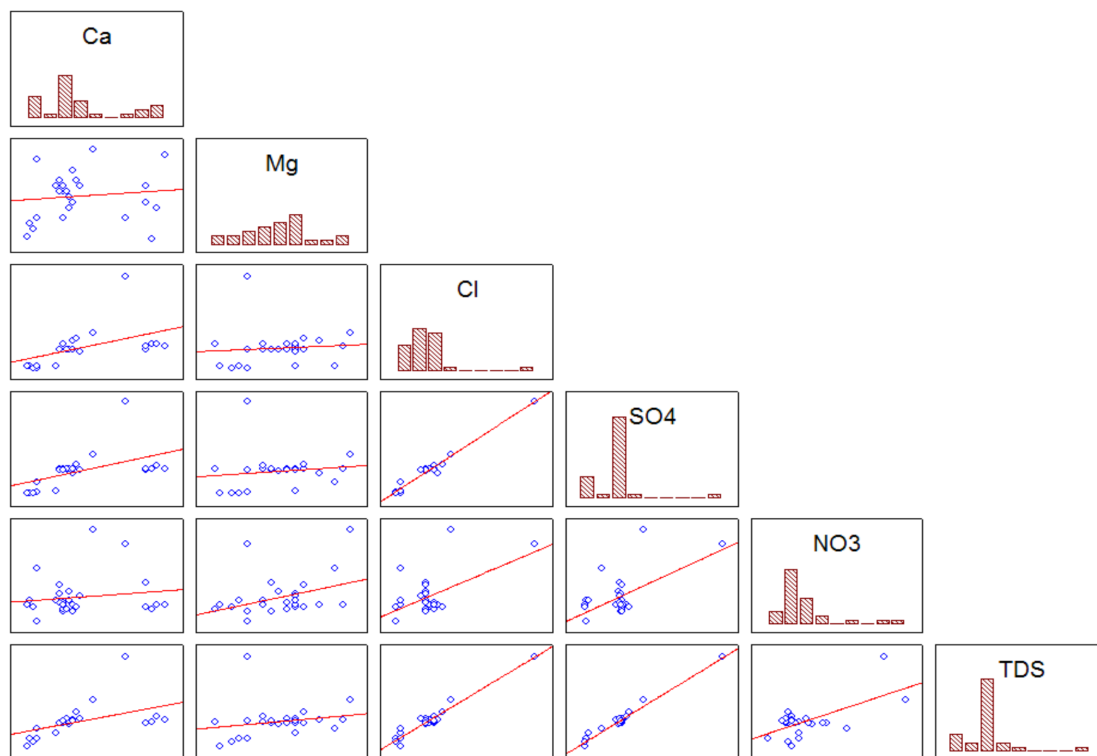


Рис. 6. Графики рассеяния по результатам определения химического состава проб подземных вод для выборки с условием $TDS < 1$ г/дм³.

Графики рассеяния для пар Cl-Ca, SO₄-Ca, TDS-Ca указывают на наличие трехкомпонентного смешения. В менее явном виде на это указывают также графики рассеяния для пар Ca-Mg, NO₃-Ca, NO₃-Mg, NO₃-Cl и NO₃-SO₄. Высокая степень рассеяния точек в парах, включающих нитраты, может быть связана с поступлением этого компонента за счет сельскохозяйственной деятельности и/или загрязнения коммунально-фекальными сбросами.

Графики рассеяния для пар Cl-Ca, SO₄-Ca, TDS-Ca имеют специфический вид, образуя два расходящихся «уса». Ветвь графиков, уходящая резко вверх по содержаниям Cl и SO₄ обусловлена поступлением хорошо растворимых компонентов с гор Шамшыкалата или других участков водосбора, содержащих эвапориты. Ветвь графика с относительно низкими и почти постоянными содержаниями Cl и SO₄ связана с выветриванием пород и стоком с водосбора в целом.

Наблюдения и оценочные расчеты подтвердили ранее выдвинутое предположение о том, что значительная доля изменения качества воды в водохранилище обусловлена смывом хорошо растворимых соединений поверхностным и подземным стоком. Областями смыва являются горы Шамшыкалата и долина р. Узун-Ахмат. В первом случае преобладает поверхностный смыв, а во втором – вынос солей в водохранилище с подземным стоком. Поверхностный компонент формирует прирост минерализации в водохранилище до 20 мг/л, а в придонной части – на уровне 60 мг/л. Долю подземного компонента предполагается оценить на численной модели водосбора Токтогульского водохранилища.

Основная доля химического стока, а значит и качество воды в Токтогульском водохранилище, связана с нормальным химическим выветриванием пород и стоком с водосбора в целом.

Проведенные исследования по оценке Токтогульского водохранилища на состав воды показали, что строительство водохранилища усилило самоочистительную способность зарегулированного участка реки р. Нарын по ряду компонентов: нитратов, нитратов, фосфору, кремнию нефтепродуктам, БПК и ХПК. Установлен факт, что в нижнем течении реки Нарын исчезли следы ДДТ, явно наблюдающиеся в начале 80-х годов за счет смыва с сельскохозяйственно освоенных земель Кетмень-Тюбинской впадины.

Осветление воды в водохранилище оценивается как положительный факт с точки зрения проблемы хозяйственно – питьевого водоснабжения и как отрицательный для целей орошения, поскольку с взвесью теряется часть питательных составляющих поливной воды.

Литература

- Аввакян А.Б., Кочарян А.Г., Майдановский Ф.Г. Влияние водохранилищ на трансформацию химического стока рек. – МАИК «Наука» - Водные ресурсы, том 21, № 2, 1994. – С. 144-153.
- Государственный водный кадастр. Том XI, Киргизская ССР.– Фрунзе, 1985.–276 с.
- Казиев К., Осмонов И., Асаналиев Ж. Гидрохимическая характеристика поверхностных вод в районе проектируемого Токтогульского водохранилища и прогноз солености его воды // Промежуточный отчет по теме № 21 «Химический состав вод Киргизии в связи с их использованием и охраной».– Фрунзе: КГГФ, 1964.– 95 с.
- Ковалев В.М. Влияние месторождения каменных солей Шамшыкалата на засоление воды в Токтогульском водохранилище // В кн. Гидрогеология и инженерная геология аридной зоны СССР.– Вып. 6. Закономерности формирования подземных вод и их ресурсы.– М.: Недра, 1972.– С. 118–125.
- Ковалев В.М. Прогноз переработки берегов Токтогульского водохранилища // В кн. Гидрогеология и инженерная геология Киргизской ССР.– Фрунзе: Илим, 1985.– С. 40–53.

6. Методические основы оценки и регламентирования антропогенного влияния на качество поверхностных вод. / Под редакцией А.В.Караушева. – Л.: Гидрометиздат, 1979.– 214 с.
- Отчет по комплексному изучению Токтогульского водохранилища проведенному в июне 1979 г. Иссык-Кульской биологической станцией АН Киргизской ССР
- Плешков Я.Ф., Мухопад В.И. Вопросы инженерной гидрохимии и охраны вод.– Л.: Гидрометиздат, 1979. - 224 с.
- Раманкулов Б.А., Матыченков В.Е. Отчет по поисковым работам в Токтогульском районе, проведенным в 1969-1971 гг. для изыскания источников водоснабжения населенных пунктов, переносимых из зоны затопления водохранилища.– Бишкек: КГГФ, 1972.
- Ресурсы поверхностных вод СССР. т.14./ Под редакцией И.А.Ильина.– Л.: Гидрометиздат, 1969. – 438 с.
- Ресурсы поверхностных вод (основные гидрологические характеристики) / бассейн р. Сыр-Дарьи, Том 14, вып. 1.– Гидрометеиздат, 1967.
- Чепков В.И., Решетников С.В. Результаты детальных поисков подземных вод для водоснабжения населенных пунктов в Токтогульском районе Таласской области Киргизской ССР. Отчет Калининской гидрогеологической партии по работам, выполненным в 1984-1988 гг. в Кетмень-Тюбинской впадине.– Бишкек: КГГФ, 1988.– 140с.