

ВЛИЯНИЕ ВОДОХРАНИЛИЩ НА ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ РЕК СЫРДАРЬЯ И АМУДАРЬЯ

Интенсификация использования водных ресурсов в Средней Азии связана с сооружением водохранилищ. В настоящее время в регионе функционирует более 60 водохранилищ емкостью не менее 10 млн. м³ каждое [5]. Объем воды, содержащейся в них, оценивается в 61,6 км³, что составляет около 50% водных ресурсов региона и гарантирует использование стока в объеме 90 км³/год. Общая площадь водной поверхности водохранилищ оценивается в 3949 км², или 6% от площади орошаемых земель региона [5]. Большая часть водохранилищ сосредоточена в бассейнах Амударьи и Сырдарьи - 39 водоемов общей емкостью 57,5 км³.

В связи с этим рассмотрим влияние водохранилищ на водные ресурсы на примере этих двух рек и их притоков.

Суммарные потери стока, связанные с сооружением водохранилища, оцениваются методом, основанным на сопоставлении стоковых рядов в верхнем и нижнем бьефах при помощи коэффициентов трансформации стока

$$K_1 = Y_{o1} / Y_{n1},$$

где K_1 - коэффициент трансформации стока в водохранилище, показывающий, во сколько раз сток в нижнем бьефе меньше (больше), чем в верхнем; Y_{n1} и Y_{o1} - средний за расчетные периоды сток в верхнем и нижнем бьефах водохранилища.

Влияние водохранилища оценивается по выражению

$$\Delta K = K_1 - K_e,$$

где ΔK - изменение коэффициента трансформации стока за рассматриваемый i -й период (K_1) по сравнению с условно-естественным (K_e) уровнем.

Для того, чтобы исключить влияние водности на значения ко-

эффициентов, сопоставляются периоды, равные по водности (по притоку к верхнему створу). Использование метода предполагает наличие параллельных наблюдений за стоком реки в верхнем и нижнем бьефах как во время работы водохранилища, так и в предшествующий период. Это, к сожалению, ограничивает количество исследуемых объектов.

Полученные выводы в значительной степени определяются точностью гидрометрического учета стока.

Для того, чтобы свести до минимума влияние случайных погрешностей, анализируются коэффициенты трансформации стока, осредненные по пятилетиям.

При наличии систематических погрешностей в одном из створов или в обоих с разным знаком можно прийти к ошибочным выводам не только о величине, но и о направленности процесса трансформации стока в водохранилище.

В связи с этим, при наличии исходной информации, выводы, полученные стоковым методом, проверялись водным балансом водохранилища.

Расчеты "стоковым" методом выполнены для семи наиболее крупных русловых водохранилищ региона, расположенных в разных высотных зонах - от горных (Нурекское, Токтогульское) до равнинных, окруженных пустыней (Тямянское, Чардаринское).

Объем этих водохранилищ составляет 85% объема всех водохранилищ региона, а площадь водной поверхности - 81% их суммарной площади. Следовательно, выводы, полученные для этих объектов, достаточно репрезентативны для всего региона.

Расчеты показали (табл. 1), что суммарные потери стока в водохранилищах составили $4,8 \text{ км}^3/\text{год}$. Это соответствует 29,1% от среднего объема водохранилищ. Большая часть этих потерь приходится на три крупных, расположенных в пустынной и полупустынной зонах - Тямянское, Чардаринское и Кайраккумское. При объеме этих водоемов, составляющем меньше трети объема водохранилищ региона, суммарные потери в них равны 94%. Относительно водных ресурсов Сырдарьи и Амударьи потери стока в исследованных водохранилищах составляют 4,9%.

Вместе с тем, аккумуляция стока в водохранилищах способ-

**Средние за период эксплуатации годовые потери стока
в крупных русловых водохранилищах региона**

Водохранилище	Период осреднения, годы	F, км ² (проектная)	НПУ, м	Потери *	
				%	км ³ /год
Тюямуюнское	1981-1990	790,0	130,0	-6	-1,93
Нурекское	1971-1990	98,0	910,0	-3	-0,60
Чимкурганское	1971-1990	45,1	488,2	2	0,60
Кайраккумское	1971-1990	510,0	346,6	-7	-1,01
Чардаринское	1971-1990	783,0	252,2	-8	-1,24
Андижанское	1981-1988	60,0	900,0	4,5	0,17
Чарвакское	1978-1990	40,0	890,0	0	0,00

Примечание. * - потери в % от притока к верхнему бьефу.

ствуется уменьшению размеров площадей, затапливаемых в поймах рек при естественном режиме. Как следствие, уменьшается испарение в бассейне, что в некоторой степени компенсирует затраты стока, связанные с водохозяйственным строительством. По данным [2], такая компенсация в бассейне Амударьи составила 2-3 км³/год.

Некоторое уменьшение стока в нижних бьефах водохранилищ по сравнению с естественными условиями связаны с затратами на заполнение емкости чаши водохранилища, испарение с водной поверхности, с обнажающегося при сработке уровня ложа и в отштуровывающихся водоемах, фильтрацию через дно и тело плотины.

В этой статье рассматриваются первые два вида затрат.

Затраты, связанные с аккумуляцией в чаше водохранилища (единовременные), оценивались по разности

$$\Delta W = W_k - W_n,$$

где ΔW - изменение объема водохранилища за расчетный период, W_n и W_k - объемы воды на начало и конец расчетного периода, полученные по связи с уровнем.

Расчеты показывают (табл. 2), что лишь в период заполнения крупных водохранилищ многолетнего регулирования можно ожидать существенного уменьшения стока в нижних их бьефах на протяжении 1-2 лет и более.

Таблица 2

Средние многолетние затраты стока на аккумуляцию в русловых водохранилищах

Водохранилище	Аккумуляция							
	млн. м ³ /год				% от притока			
	1971-1975	1976-1980	1981-1985	1986-1990	1971-1975	1976-1980	1981-1985	1986-1990
Токтогульское		2032	-1119	4063		21,7	-11,9	32,8
Чардаринское	-673	211	223			-6,3	2,5	2,2
Тямяунское			238	301			0,7	0,9
Нурекское	321	1096	-49	71	1,7	5,5	0,3	0,4
Кайраккунское	-557	286	-94,2	235	-4,7	2,5	-0,7	1,4
Чарвакское			33,2	6,4			0,6	0,1
Тяябугузское	7,4	-6,0	8,0	4,2	1,8	-0,9	2,4	0,6
Чимкурганское	-9,1	5,8	53,4	18,2	-1,5	0,8	8,4	3,1

Примечание. Минус - сработка, плюс - аккумуляция

В бассейне Сырдарьи затраты на заполнение водохранилищ возросли с 0,6 км³/год в конце 60-х годов до 2,54 км³/год во второй половине 70-х; в конце 80-х они составили 4,30 км³/год.

В бассейне Амударьи максимальное заполнение водохранилищ также имело место в 70-е годы.

На заполнение Нурекского водохранилища было затрачено 708 млн. м³/год, что составило 4,1% от стока р. Вахш в створе Комсомолабад.

Всего за 1976-1980 годы в бассейнах Сырдарьи и Амударьи на заполнение водохранилищ было затрачено 3,6 км³/год, что соответствует 3,9% поверхностных водных ресурсов региона. В конце 80-х годов затраты на аккумуляцию выросли до 4,7 км³/год (5% водных ресурсов).

Ежегодно возобновляемые затраты стока на испарение слагаются из испарения с водной поверхности, с обнажающегося (при сработке уровня) ложа и с отшнуровывающихся водоемов.

Суммарные годовые потери стока на "видимое" испарение в исследуемых водохранилищах составили $1,2 \text{ км}^3/\text{год}$, а в целом по региону - около $1,6 \text{ км}^3/\text{год}$.

Полученные оценки существенно ниже приводимых В. С. Вуглинским [1], что связано, вероятнее всего, с различным подходом к оценке размера испаряющей поверхности.

При ирригационном режиме работы водохранилищ средняя годовая площадь зеркала водной поверхности существенно отличается от проектной.

Различия в оценке испарения по фактической средней годовой и проектной площадям водной поверхности водохранилищ в исследуемом регионе тем более велики, так как сработка уровня осуществляется в летнее, наиболее богатое энергетическими ресурсами (приток солнечной радиации и адвекция тепла) время.

По нашим расчетам, на уровне 80-х годов ежегодные затраты стока на испарение с водной поверхности водохранилищ исследуемой территории составили 1,7% от поверхностных водных ресурсов в год средней водности.

Аналогичные результаты (1,0 и 3,5%) получены для водохранилищ в бассейнах рек Кура и Аракс [2]. Естественно, что львиная доля потерь на испарение с водной поверхности приходится на крупные равнинные водохранилища (табл. 3).

В зависимости от степени заполнения и сработки водохранилищ, эксплуатационных особенностей отдельных лет, а также метеорологических условий (атмосферные осадки и энергетический фактор) потери стока на испарение с их водной поверхности могут колебаться в значительных пределах.

Анализ временной изменчивости затрат стока на испарение, выполненный для Кайраккумского водохранилища, по которому имеются наиболее длинные ряды наблюдений, показал, что коэффициент вариации испарения за май-октябрь равен 0,30, а за ноябрь-апрель - 0,48 [7].

**Среднее за 1981-1990 годы "видимое" испарение
с водной поверхности русловых водохранилищ, млн. м³**

Водохранилище	Испарение за период				
	I-III	IV-VI	VII-IX	X-XII	I-XII
Нурекское	-18.0	12.0	40.0	-1.4	32.8
Токтогульское	5.9	7.4	57.2	26.5	97.0
Чарвакское	-3.6	1.8	9.0	0.0	7.2
Тямяуьское	1.8	132.0	199.0	81.6	414.0
Чимкуртанское	-2.7	6.6	6.6	-0.3	10.2
Кайраккумское	7.5	143.0	126.0	36.6	313.0
Чардаринское	-35.8	174.0	175.0	30.1	343.0
Тябугузское	-1.2	4.2	5.4	0.6	9.0
Итого: горные	-15.7	21.2	106.4	25.1	137.0
равнинные	-30.4	459.8	512.0	148.6	1089.2
Всего	-46.1	481.0	618.4	173.7	1226.2
Равнинные водо- хранилища, % от общей суммы	65.9	95.6	82.8	85.5	88.8

Регрессионный анализ факторов, определяющих изменчивость потерь стока на испарение, показал, что в условиях одного водоема определяющим является его площадь. Изменчивость энергетических ресурсов (приток солнечной радиации и адвекция тепла) и атмосферных осадков не оказывает в этом случае значимого влияния на величину испарения [7].

Вместе с тем, энергетический фактор может сказаться на пространственном изменении потерь на испарение.

Так, средние годовые потери стока в Тямяуьском, Тудакульском и Талимарджанском водохранилищах значительно выше, чем в других при аналогичных площадях (рис. 1, а).

Этому способствует адвекция тепла с окружающих эти водоемы пустынных территорий и малое количество атмосферных осадков.

При осреднении за достаточно длительный период времени (5-10 лет) вариация метеорологических факторов сводится к мини-

муму, и затраты стока на испарение с водной поверхности водохранилищ определяются площадью водной поверхности (рис. 1, б).

Вид кривой $Z_b = f(F)$ (рис. 1, б) свидетельствует о том, что затраты на испарение резко возрастают в диапазоне площадей 100–350 км². При площади менее 100 км² кривая асимптотически приближается к оси абсцисс.

Вероятно, большие водоемы создают микроклимат, способствующий снижению удельного испарения с водной поверхности.

Потери стока на испарение с водной поверхности водохранилищ неравномерно распределяются внутри года (табл. 3). Около 90% годовых потерь приходится на апрель–сентябрь, когда энергетические ресурсы велики, а атмосферные осадки минимальны. В январе–марте большинство водохранилищ аккумулируют атмосферные осадки.

Таким образом, "видимое" испарение способствует перераспределению стока внутри года.

Помимо затрат стока на испарение с водной поверхности водохранилищ на некоторых из них необходимо учитывать испарение с обнажающегося ложа и с стнуровывающихся водоемов. В аридном климате, при ирригационном типе регулирования стока, когда в летнее время срабатываются основные запасы воды в водохранилище и обнажается его переувлажненное ложе, необходимо учитывать испарение с него. Для оценки этого вида потерь использована методика [6], основанная на исследованиях на Каттакурганском водохранилище [3].

Расчеты, выполненные с декадным шагом на ПЭВМ по программе, разработанной А. С. Никулиным, показали следующее. Потери стока имеют место с апреля по сентябрь, хотя в отдельные годы период сработки может быть короче. Испарение с обнажающегося ложа Кайраккумского и Чардаринского водохранилищ составляет в среднем (1981–1990 гг.) 12 и 23 млн. м³, что соответствует 4,7 и 5,8% от испарения с водной поверхности за этот период.

Аналогичные потери в Чарвакском водохранилище на порядок меньше – 0,45 млн. м³. Однако, относительно испарения с водной поверхности за тот же период они составляют в среднем 3%.

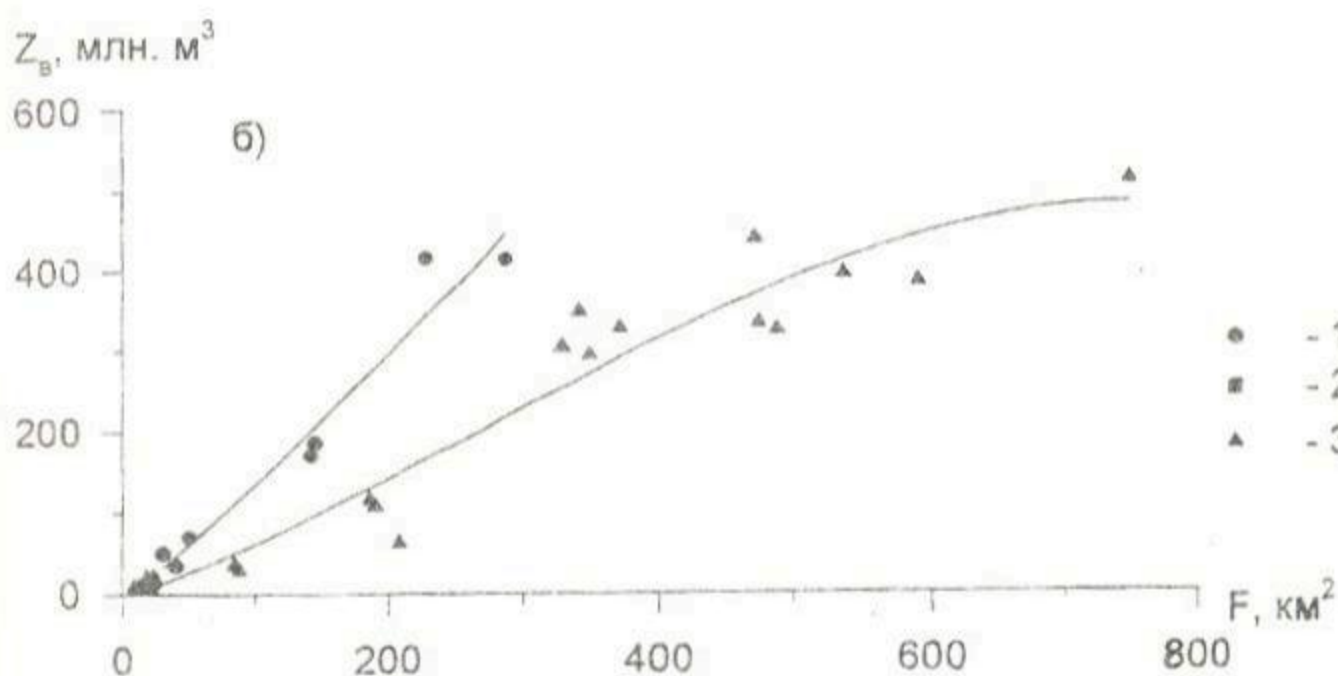
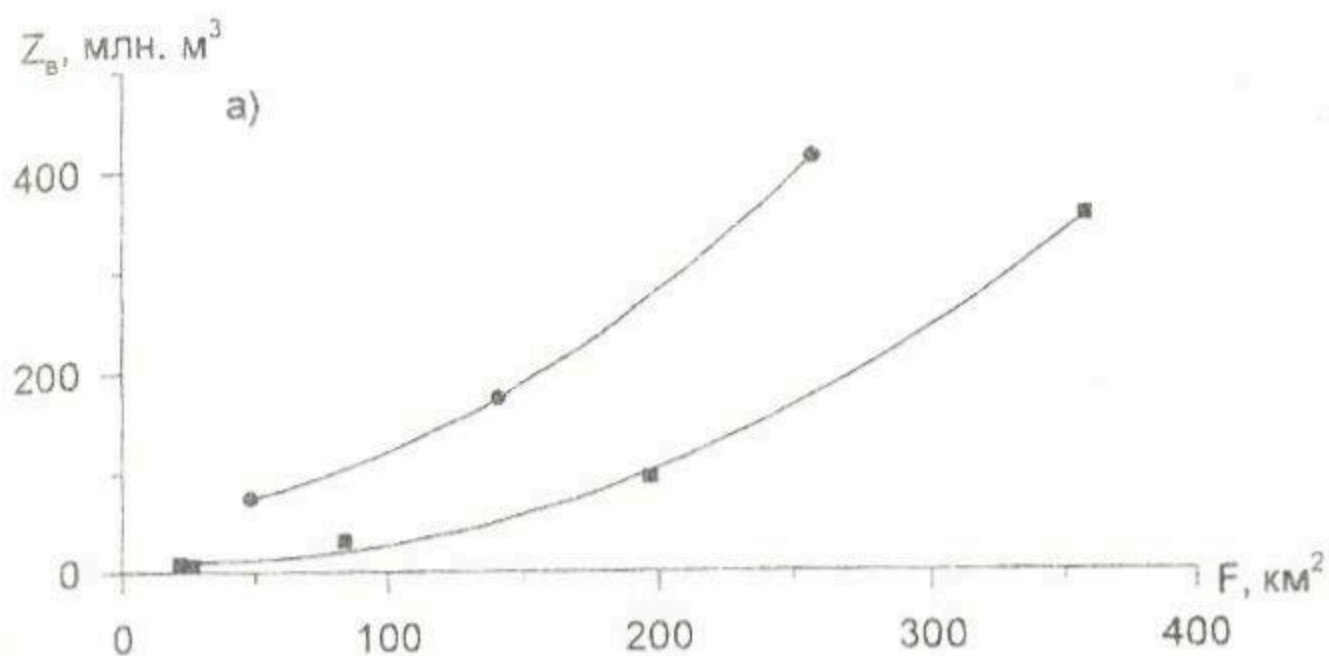


Рис. 1. Потери стока на испарение с водной поверхности водохранилищ ($Z_{\text{в}}$) в зависимости от площади водного зеркала (F) за период 1981-1990 годы (а) и среднее по пятилетиям (б). 1 - Тюмунское, 2 - Тудакульское и Талимарджанское, 3 - Нурекское, Токтогульское, Чарвакское, Чимкуртанское, Кайраккумское, Чардаринское.

Ежегодные потери на испарение с обнажающегося ложа водохранилища колеблются в зависимости от уровня его сработки и метеорологических условий года. Потери возрастают по мере увеличения сработки водохранилища (рис. 2).

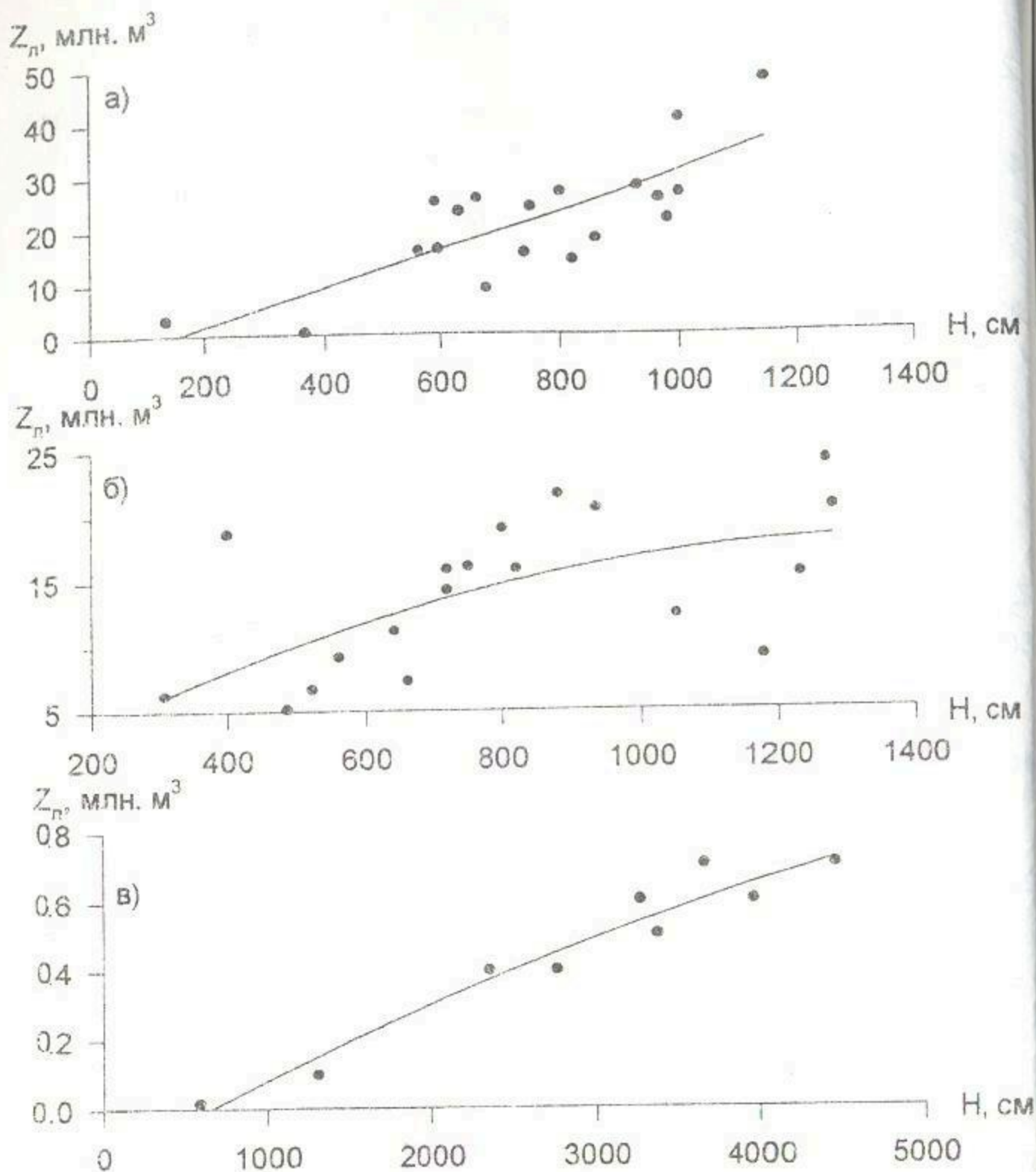


Рис. 2. Испарение с обнажающегося дна водохранилища (Z_n) в зависимости от уровня его сработки (H): а) Чардаринское, б) Кайраккумское, в) Чарвакское водохранилища.

Средняя многолетняя величина потерь на испарение с обнажающегося ложа зависит от высотного положения водоема.

Чем ниже расположено водохранилище, тем более плоскую чашу оно занимает и, следовательно, тем большая площадь освобождается от воды при его сработке.

По ориентировочным оценкам потери стока с обнажающегося ложа русловых водохранилищ региона в среднем за 1981-1990 годы составили 81,5 млн. м³, что соответствует 5% от испарения с водной поверхности за год.

При опорожнении равнинных водохранилищ на их дне остаются изолированные неглубокие водоемы, вода из которых расходуется на испарение и фильтрацию. Наиболее часто они возникают на равнинных неглубоких водохранилищах, затапливаемых при высоких отметках уровня воды большие площади.

Нами сделана попытка оценить потери речного стока в отшнуровывающихся водоемах на примере двух самых крупных равнинных водохранилищ региона - Чардаринского и Туямунского. Для этой цели использованы космоснимки их акватории в разные годы и при различных уровнях воды. На снимках выделены отшнуровавшиеся от водохранилища озера, определены их площадь и количество.

На Чардаринском водохранилище имеющиеся в нашем распоряжении космоснимки фиксируют площадь отшнуровывающихся водоемов при уровне воды в водоеме от 243 до 249 м. В этом диапазоне уровней наблюдается максимальный прирост зеркала водной поверхности: с 240 км² при 243 м до 680 км² при 249 м.

Очевидно, что при максимальном заполнении водохранилища (до отметки 252 м) площадь отшнуровывающихся водоемов равна нулю.

Затем, по мере снижения уровня воды в водохранилище, площадь этих водоемов возрастает до 17-25 км². При уровне воды ниже 243 м сведения о площади временных озер отсутствуют. Однако, резкое уменьшение площади водного зеркала при уровне ниже этой отметки свидетельствует о больших глубинах, что исключает возможность формирования мелководных озер при таких отметках.

Исходя из изложенного, можно предположить, что временные замкнутые водоемы формируются на дне опорожняющегося Чардаринского водохранилища лишь в годы, когда уровень превышает отметку 249 м, а спад его продолжается вплоть до зимних месяцев.

Для этих лет по минимальному значению уровня воды в водохранилище определена суммарная площадь временных озер. Для оценки количества водоемов использована их связь с суммарной

площадью, полученная при обработке упомянутых выше космоснимков.

Результаты расчетов показывают, что средняя площадь таких водоемов (F_0/n) не превышает $0,3 \text{ км}^2$, а глубина $0,5-1,0 \text{ м}$ [4]. Следовательно, объемы потерь из отшнуровывающихся водоемов Чардаринского водохранилища в многоводные и средневодные годы, когда максимальный уровень воды в нем превышал 249 м , колеблются в пределах $7-20 \text{ млн. м}^3$ ($1,1-5,4\%$ от испарения с водной поверхности).

В среднем за 1967-1987 годы потери в отшнуровывающихся водоемах Чардаринского водохранилища составили $8-16 \text{ млн. м}^3$, или $1,5 - 3,2\%$ от испарения с водной поверхности. Вместе с тем, в период стояния минимального уровня воды в водохранилище (август-сентябрь) площадь отшнуровывающихся водоемов в отдельные годы может составлять от $2,6$ до $22,7\%$ площади его водного зеркала.

В такие периоды потери воды в отшнуровывающихся водоемах сопоставимы с испарением с водной поверхности. В целом за год эти потери относительно невелики.

Аналогичные расчеты по Тюямуюнскому водохранилищу показали, что объем потерь не превышает $5-10 \text{ млн. м}^3$. Относительно годовых потерь на испарение с водной поверхности это составляет $1,1-2,2\%$.

Вместе с тем, в отдельные летние месяцы при глубокой сработке уровня потери стока во временных водоемах сопоставимы с испарением с водного зеркала. Так, в августе 1986 года они составили $17,0\%$, а в сентябре 1988 г. - $7,6\%$ от испарения с водной поверхности водохранилища.

Суммарные потери стока в отшнуровывающихся водоемах двух из трех крупных равнинных водохранилищ не превышают $30 \text{ млн. м}^3/\text{год}$, что составляет $1,9\%$ от испарения с водной поверхности.

Даже с учетом потерь в Кайраккумском водохранилище этот их вид не превышает 3% от испарения с водной поверхности всех водохранилищ.

С учетом всех видов испаряющих поверхностей суммарные за-

траты стока в русловых водохранилищах региона на уровне 80-х годов достигли $1,71 \text{ км}^3/\text{год}$.

Резюмируя изложенное выше, можно сделать следующие выводы.

Суммарные потери стока в русловых водохранилищах региона на уровне 80-х годов составили $4,8 \text{ км}^3/\text{год}$, что соответствует 4,9% от водных ресурсов региона. Потери эти в некоторой степени компенсируются уменьшением испарения с поймы при разливах реки в естественном состоянии.

В периоды заполнения емкостей крупных водохранилищ многолетнего регулирования можно ожидать существенного и длительного уменьшения стока в их нижних бьефах. При заполнении водохранилищ сезонного регулирования эти изменения кратковременны и не сказываются при осреднении стока за длительный период.

Потери стока на испарение с водной поверхности водохранилищ на уровне 80-х годов составили в регионе $1,6 \text{ км}^3/\text{год}$, что соответствует 1,7% поверхностных водных ресурсов в год средней водности.

Испарение с переувлажненного ложа водохранилища, обнажающегося при сработке уровней, не превышает 5% от испарения с водной поверхности.

Испарение в отштуровывающихся водоемах не превышает 3% от испарения с водной поверхности.

Список литературы

1. В у г л и н с к и й В. С. Водные ресурсы и водный баланс крупных водохранилищ, -Л.: Гидрометеиздат, 1991. - 223 с.
2. Г о л у б е в В. С. и др. Динамика потерь стока на испарение с поверхности водохранилищ Кура-Араксинского бассейна / В. С. Голубев, К. В. Цыценко, Н. Л. Солянин // Метеорология и Гидрология. - 1989. - № 6. - С. 103-109.
3. М и л ь к и с Б. Е. и др. Испарение с поверхности Каттакурганского водохранилища // Б. Е. Милькис, Л. П. Могильников, М. С. Саатов // Изв. АН Узбекистана, сер. техн. - 1960. - Вып. 6 - С. 56-66.

4. Н и к и т и н А. М. Водные ресурсы и водный баланс озер и водохранилищ Средней Азии //Тр. САНИГМИ. - 1986. - Вып. 108(189). - 95 с.

5. Н и к и т и н А. М. Водохранилища Средней Азии. -Л.: Гидрометеиздат, 1991. - 164 с.

6. Р е к о м е н д а ц и и по расчету испарения с поверхности суши. -Л.: Гидрометеиздат, 1976. - 96 с.

7. Р у б и н о в а Ф. Э., Ш у л ь ц А. Г. Затраты стока на испарение с водной поверхности в бассейне Аральского моря //Тр. САНИГМИ. - 1990. - Вып. 133 (214). - С. 56-60.