

ОБ ИЗМЕНЕНИИ ОБЩЕЙ МИНЕРАЛИЗАЦИИ ВОДЫ р. СЫРДАРЬИ В СВЯЗИ С РАЗВИТИЕМ ОРОШЕНИЯ В ЕЕ БАССЕЙНЕ

Задачи научного обоснования, использования и охраны водных ресурсов требуют углубленного изучения качества воды. Эта проблема особенно актуальна для регионов с напряженным современным и перспективным водохозяйственным балансом, каким является бассейн р. Сырдарьи. Число работ, посвященных изучению изменения минерализации воды среднеазиатских рек под влиянием орошения, относительно мало [3, 4, 5, 8]. Особо ценной из них является работа К. Л. Лазарева и других [8], где сделана попытка прогнозирования минерализации воды р. Сырдарьи в связи со строительством водохранилищ и орошением земель в ее бассейне. Количественные оценки, полученные в этой статье, основаны на малодостоверных и ориентировочных величинах минерализации возвратных вод, их доли в бытовом стоке реки и т. д. и нуждаются в уточнении. Однако вывод о доминирующей роли количества и минерализации возвратных вод в ожидаемых изменениях минерализации воды р. Сырдарьи, как будет показано ниже, полностью подтвердился. Подробная физико-химическая характеристика воды р. Сырдарьи дана в работах Б. А. Беремжанова, А. И. Ибрагимова и М. А. Ибрагимовой [4, 5]. Ими также затронуты вопросы влияния орошения на общую минерализацию воды и основное внимание уделено метаморфизации состава воды, ее классу и типу, содержанию микроэлементов, карбонатно-кальциевому равновесию. Результаты, полученные в этих работах, необходимо дополнить четкими количественными соотношениями между изменениями гидрохимического режима р. Сырдарьи, количеством и качеством возвратных вод.

В перечисленных работах исследование рассматриваемого вопроса проводится с позиций гидрохимической науки. Особенности водного режима, гидрологические характеристики и показатели ирригационного использования воды применяются недостаточно.

Хотя несомненны преимущества комплексного рассмотрения этой сложной проблемы, полезными представляются и результаты чисто гидрологического анализа, оформленные в виде инженерных расчетов и прогнозов общей минерализации и содержания отдельных компонент. Из упомянутых выше работ известно, что по мере увеличения отъема стока из реки для нужд орошения и сброса в нее коллекторно-дренажных вод доля последних в стоке реки возрастает, что сопровождается повышением общей минерализации, изменением качественного состава, увеличением выноса микроэлементов и т. д. Из широкого круга возникающих при этом вопросов в данной статье рассмотрено лишь изменение общей минерализации в области формирования стока и в области его «рассеивания».

Последние понятия, введенные В. Л. Шульцем [13], показывают коренные различия гидрологических функций горной и равнинной территории Средней Азии.

Использованные материалы

Первые сведения о минерализации воды в реке относятся в 1911—1913 гг., когда отбор проб проводился ежемесячно. Затем наблюдения не проводились вплоть до конца 30-х годов и в последующие годы велись весьма нерегулярно.

Таблица 1

Количество проб, отобранных для определения химического состава воды р. Сырдарья

Река	Створ	Период					Всего
		1911— 1913 гг.	1931— 1940 гг.	1941— 1950 гг.	1951— 1960 гг.	1961— 1970 гг.	
Нарын	Учкурган	31	18	20	97	49	215
Карадарья	Кампыррават	—	18	16	54	57	145
Сырдарья	Каль	—	13	49	109	60	231
"	Акджар	—	—	—	36	46	82
"	Кзылкишлак	—	—	—	51	28	79
"	Бекабад	33	44	50	2	30	159
"	Надеждинский	—	—	—	66	—	66
"	Чиназ	—	—	—	—	62	62
"	Кокбулак	—	20	36	6	—	62
"	Тюмень-Арык	—	5	—	51	19	75
"	Казалинск	20	3	17	80	33	153
	Всего	84	121	188	552	384	1328

В 1911—1913 гг. химический состав в реке изучался в четырех створах, в 40-х годах их число возросло до шести, а в последующих десятилетиях до девяти.

Наибольшее число проб было отобрано в 50-х годах, после чего их количество сократилось в отдельных створах до 4—5 в год (табл. 1). При критическом анализе результаты некоторых проб были забракованы.

Для решения поставленной задачи интересно проследить изменение минерализации в створе Бекабад, замыкающем Ферганскую долину, и створе Кокбулак, замыкающем среднее течение реки, в пределах которого находятся основные водопотребители — Голодная степь и Чирчик-Ахангаран-Келесский ирригационный район (ЧАКИР).

К сожалению, в 1951—1960 гг. в створе Бекабад и в 1951—1970 гг. в створе Кокбулак наблюдения не велись. Вследствие этого с некоторым допущением в дальнейшем мы вынуждены вместо створа Бекабад принимать створ Надеждинский, а вместо створа Кокбулак принимать створ Тюмень-Арык. И в том и в другом случаях сбросы в реку на этих участках отсутствовали, а имелся лишь забор воды из реки.

Режим общей минерализации воды в области формирования стока

В пределах горной территории, где формируется сток всех рек Средней Азии, в том числе р. Сырдарья, использование водных ресурсов и хозяйственная деятельность развиты очень слабо. Размеры орошаемых площадей, заборов воды из реки и сбросов здесь ничтожны, поэтому нет оснований предполагать заметных изменений минерализации. Это положение подтверждается при анализе расположения точек в координатном поле $\bar{\Sigma}_{\text{и}} = f(Q)$ для двух основных составляющих р. Сырдарья — Нарын (п. Учкурган) и Карадарья (п. Кампыррават), — которые рассматриваются как индикаторы гидрохимического режима горной области. Пример таких кривых приведен на рис. 1.

Эмпирические точки за различные десятилетия осреднены по интервалам расходов с шагом $50 \text{ м}^3/\text{с}$. Следует отметить лишь пониженные значения общей минерализации воды, соответствующие периоду 1911—1913 гг. Последнее обстоятельство, по-видимому, связано со спецификой производства наблюдений в тот период: ежедневный отбор проб и их смешение с последующей обработкой осредненной пробы в конце месяца.

Примененное на рис. 1 осреднение суммы ионов по интервалам водности удобно для оценки тренда в многолетнем разрезе, но многие важные черты гидрохимического режима при этом теряются. Для их выявления, оценки точности зависимостей и проверки возможности применения осреднения за десятилетия анализировались связи $\bar{\Sigma}_{\text{и}} = f(Q)$ для различных фаз режима лет разной водности. Необходимость учета этих особенностей отмечена

О. А. Алекиным [2], М. А. Буркальцевой [6] при анализе гидрохимического режима двух притоков Карадарьи — рек Чангетсу и Ясы за период 1956—1961 гг. и в ряде других работ [12].

Следуя Буркальцевой [6], в зависимости от обеспеченности среднегодового расхода воды ($P_{\bar{Q}}$) выделены годы повышенной ($P_{\bar{Q}} < 25\%$), средней ($25\% < P_{\bar{Q}} < 75\%$) и пониженной водности ($P_{\bar{Q}} > 75\%$). Существенными оказались также различия в общей минерализации воды для двух периодов: подъема половодья (апрель — июнь), а также его спада (июль — сентябрь) и межени

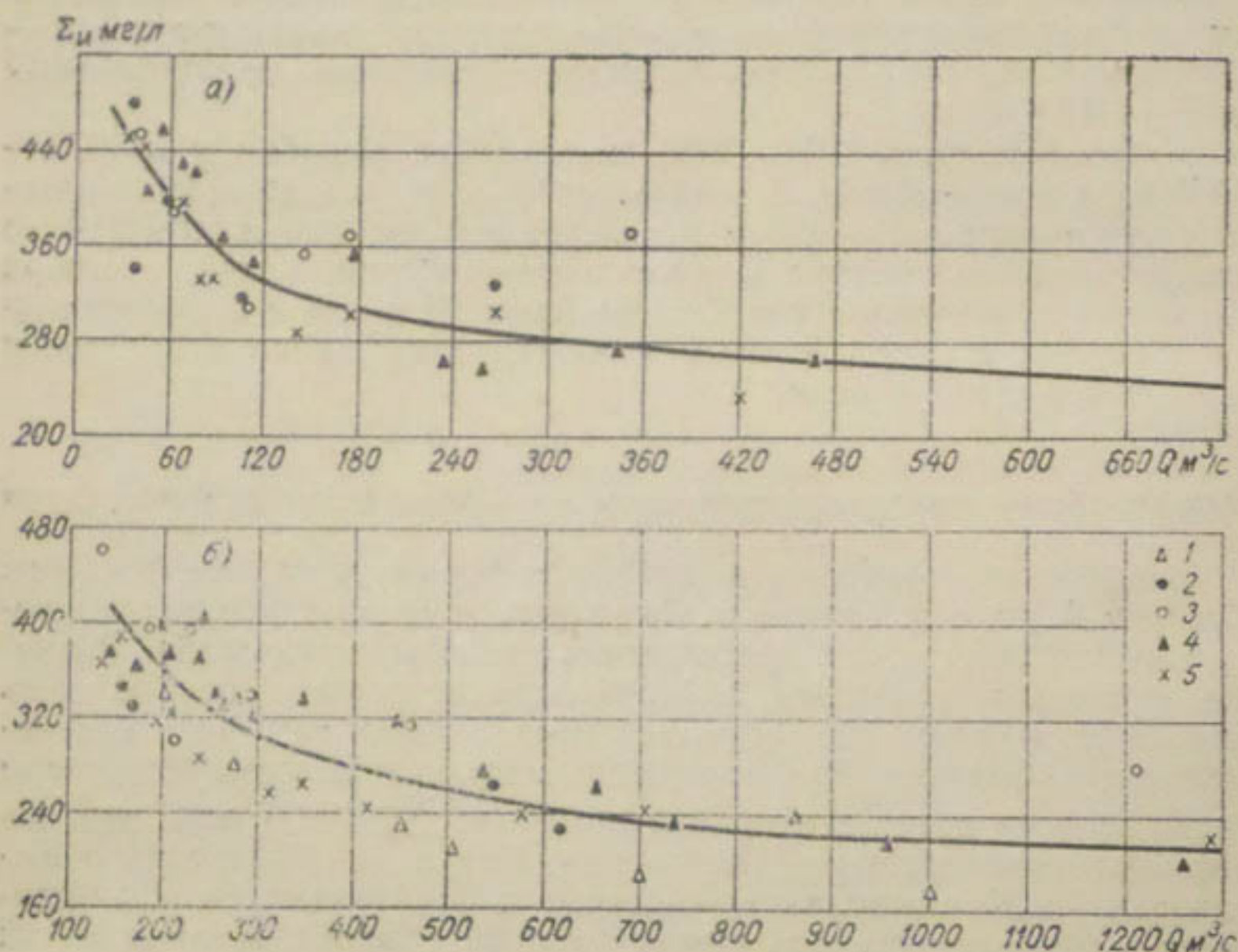


Рис. 1. Зависимость минерализации воды от расхода воды.

а — Карадарья (Кампырват), б — Нарын (Учкурган); 1 — 1911—1913 гг., 2 — 1937—1940 гг., 3 — 1941—1943, 1950 гг., 4 — 1951—1960 гг., 5 — 1961—1970 гг.

(октябрь — март). Поскольку зависимости $\Sigma_{и} = f(Q)$ являются нелинейными, для получения уравнений регрессии и оценки тесноты зависимостей между переменными использована методика выравнивания и нормализации нелинейных монотонных зависимостей, разработанная Г. А. Алексеевым. Подробное описание ее с рекомендациями по практическому применению дано в работе [1]. Общий вид уравнения однофакторной нормализованной регрессии таков:

$$u(\Sigma_{и}) = r_{u(\Sigma_{и})u(Q)} u(Q), \quad (1)$$

где $r_{u(\Sigma_{и})u(Q)}$ — коэффициент корреляции нормализованных величин расходов $u(Q)$ и общей минерализации $u(\Sigma_{и})$.

Для перехода от нормализованных к исходным значениям переменных используются графики связи этих величин вида $u(Q) = f(Q)$. Пользуясь этими графиками и уравнением (1), можно определить координаты эмпирической зависимости $\sum_{и} = f(Q)$. Примеры таких зависимостей даны на рис. 2. Важно отметить, что значения $r_{u(\sum_{и})u(Q)}^2$ характеризуют долю общей изменчивости минерализации, объясняемую колебаниями водности реки. Пользуясь методикой Алексеева, можно не только построить нелинейную зависимость между аргументами, но и описать степень рассеивания эмпирических точек относительно линии регрессии. Для этой цели используются дисперсия уравнения нормализованной регрес-

Таблица 2

Значения коэффициентов корреляции нормализованных значений расходов и общей минерализации

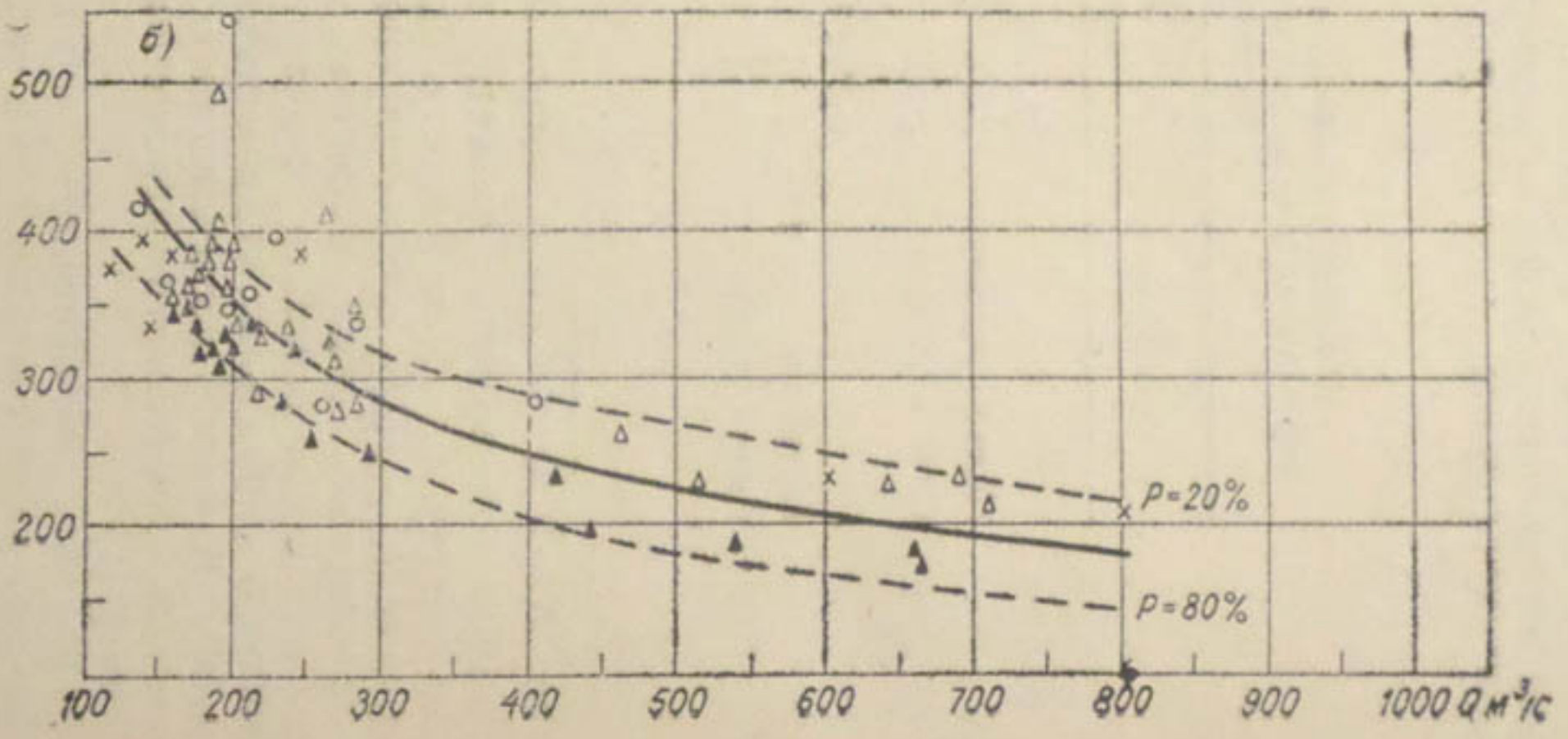
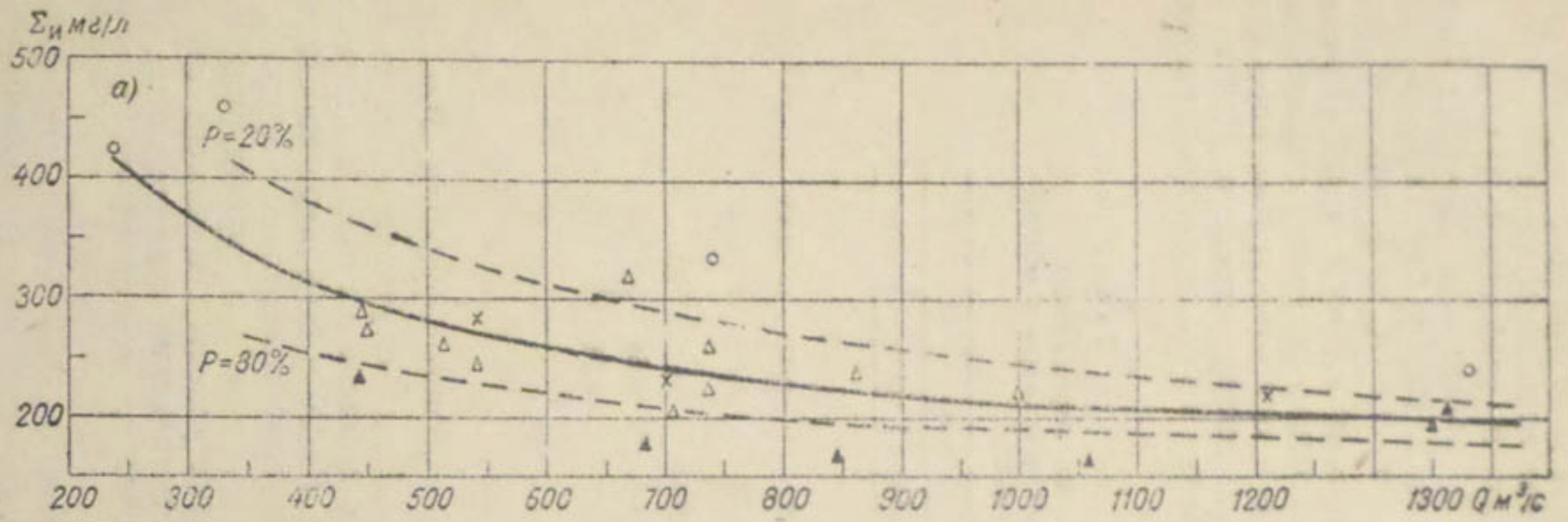
Фазы режима	Водность года		
	многоводный	средний	маловодный
р. Нарын			
Подъем половодья	0,62	0,78	0,42
Спад и межень	0,76	0,85	0,83
р. Карадарья			
Подъем половодья	0,64	0,64	0,54
Спад и межень	0,83	0,75	0,72

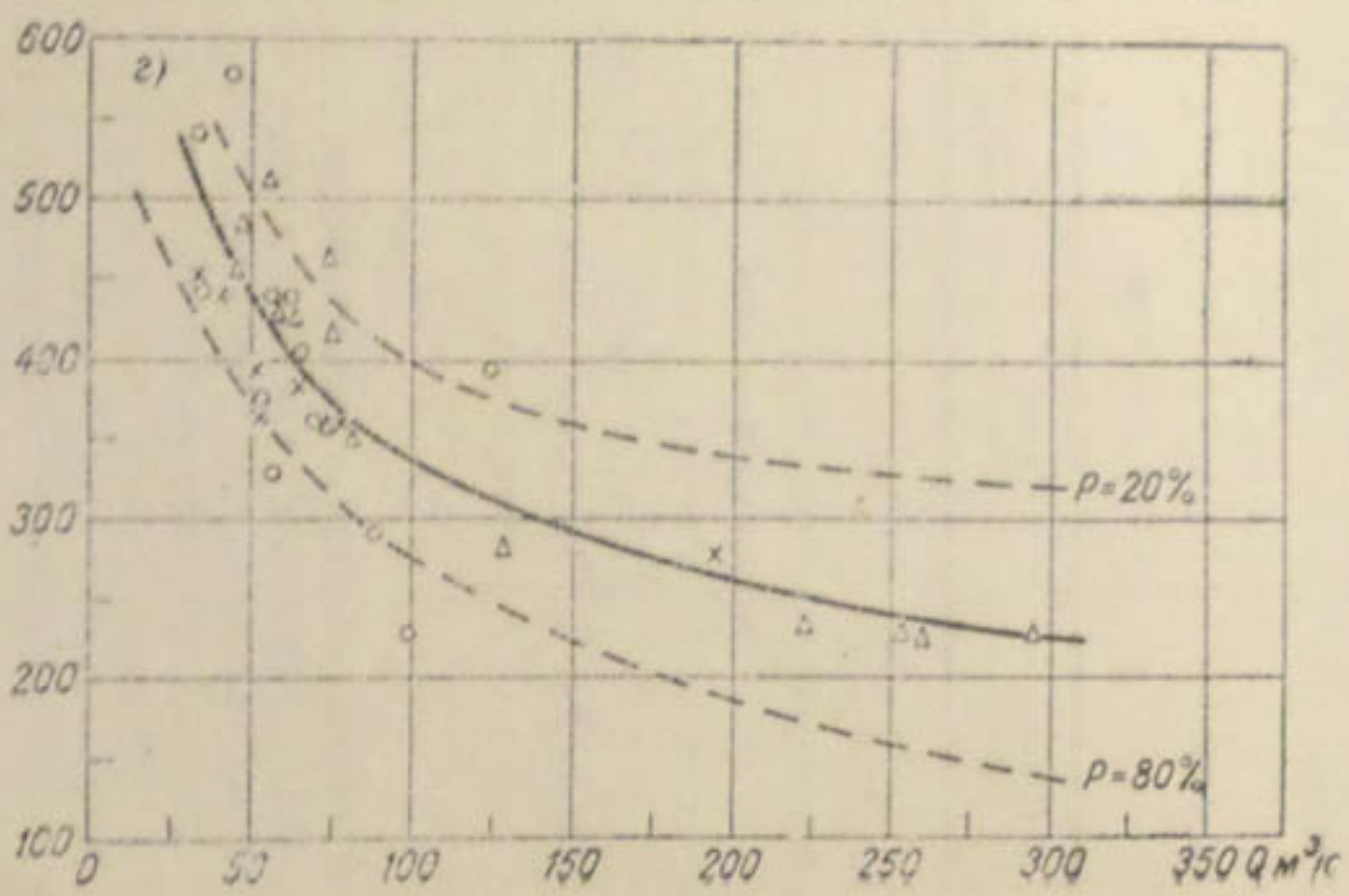
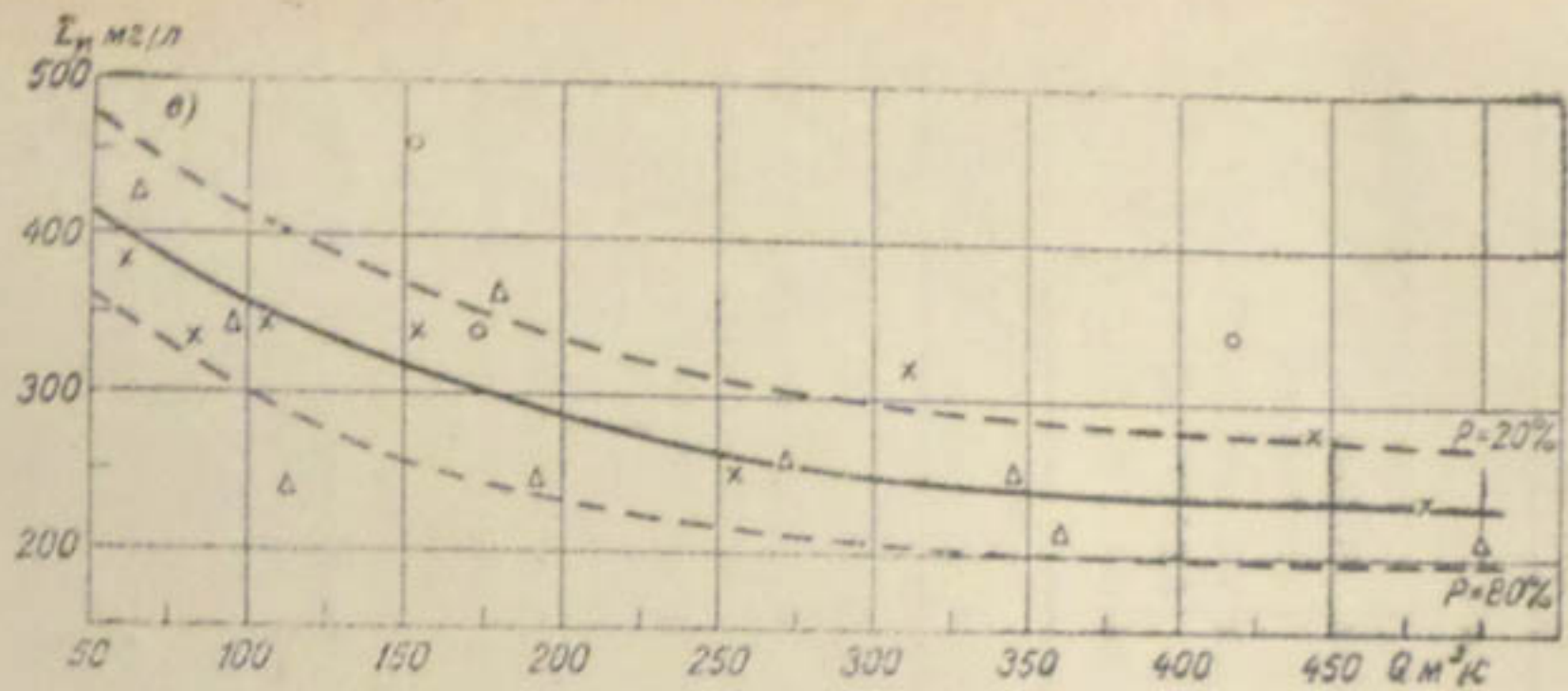
сии $S = \sqrt{1 - r_{u(\sum_{и})u(Q)}^2}$ и известные таблицы функции Лапласа, которые позволяют провести границы случайного рассеивания различной обеспеченности. Для примера на рис. 2 нанесены кривые $\sum_{и} = f(Q)$, соответствующие $P = 20$ и 80% вероятности превышения. Резкое отклонение эмпирических точек за границы случайного рассеивания свидетельствует либо о грубых ошибках, либо об аномальных гидрохимических условиях в момент взятия пробы. Важность исследования статистических характеристик временной изменчивости гидрохимических элементов отмечена в работе [7].

В табл. 2 приведены значения $r_{u(\sum_{и})u(Q)}$ для выделенных фаз лет разной водности, а в табл. 3 — координаты эмпирических кривых $\sum_{и} = f(Q)$.

Период спада и межени характеризуется большей теснотой зависимости $\sum_{и}$ от водоносности по сравнению с подъемом половодья. В этот период более половины изменчивости общей минерализации объясняется изменчивостью расходов воды ($r^2 = 0,52 - 0,72$).

Относительно высокая точность зависимостей $\sum_{и} = f(Q)$ в этот





- ▲ 1
- 2
- 3
- △ 4
- × 5

Рис. 2. Зависимость общей минерализации воды от расхода воды для разных фаз водного режима лет средней водности.

р. Нарьян (Учкурган): а — подъем половодья; б — спад и межень; Карадарья (Кампыррат): в — подъем половодья; г — спад и межень; 1 — 1911—1913 гг., 2 — 1937—1940 гг., 3 — 1941, 1943, 1950 гг., 4 — 1951—1960 гг., 5 — 1961—1970 гг.

период обусловлена отсутствием дождевых паводков и большой долей участия в стоке рек устойчивого грунтового питания. На подъеме половодья условия формирования гидрохимического режима рассматриваемых водотоков сложнее. Уровень случайности здесь существенно больше за счет прохождения дождевых паводков, разновременности поступления водных масс с различных частей водосбора. Изменчивостью водоносности в эту фазу объясняет-

Таблица 3

Координаты кривых $\Sigma_{\text{и}}=f(Q)$ для различных фаз водного режима лет разной водности

Водность года	Фазы водного режима	$Q \text{ м}^3/\text{с}$										
		30	50	100	150	200	300	500	700	1000	1500	1800
р. Нарын — Учкурган ($\Sigma_{\text{и}}$ мг/л)												
Многоводные	Подъем половодья						550	315	255	220	200	196
	Спад и межень			445	398	360	324	284	258	237		
Средние	Подъем половодья					533	375	280	240	212	171	
	Спад и межень				380	345	280	230	206			
Маловодные	Подъем половодья					325	295	260	242	232		
	Спад и межень				366	304	248	229	224			

Водность года	Фазы режима	$Q \text{ м}^3/\text{с}$											
		40	60	80	100	120	180	240	300	400	500	600	
р. Карадарья — п. Кампыррават													
Многоводные	Подъем половодья				423	404	390	351	320	295	264	250	243
	Спад и межень	510	456	404	364	334	300	288	282	272	264	260	
Средние	Подъем половодья	432	406	386	366	348	300	268	250	239	231		
	Спад и межень	480	400	358	336	318	276	247	228				
Маловодные	Подъем половодья		350	340	330	325	300	285	270				
	Спад и межень	450	380	336	311	292	252						

ся менее половины изменчивости общей минерализации ($r^2=0,16—0,42$), кроме лет средней водности по р. Нарын). Строго говоря, в этих условиях однофакторная зависимость $\Sigma_{\text{и}}=f(Q)$ не является расчетной, так как основные естественные причины, определяющие изменчивость общей минерализации, остаются неизвестными. Это обстоятельство свидетельствует о необходимости более углубленного изучения гидрохимического режима области формирования стока рек Средней Азии. В частности, видимо, принятое нами и в предшествующих работах [2, 6] деление на три группы водности лет недостаточно. Так, общая минерализация воды и со-

держание отдельных ионов на подъеме половодья в экстремальные по водности годы — 1953 и 1969 — ($P\bar{q}_{\text{ср. год}} \approx 1\% - 5\%$) существенно превышают осредненные значения по кривым $\Sigma_{\text{и}} = f(Q)$ для лет повышенной водности. Однако более детальному анализу влияния степени водоносности на минерализацию воды препятствует ограниченность исходных данных и тем самым невозможность подсчетов ионного стока за конкретные интервалы времени, продолжительностью менее года, особенно при принятой в последние годы частоте отбора проб (5—8 раз в год).

Таблица 4

Минерализация воды р. Нарын (мг/л), рассчитанная по осредненной за многолетие кривой $\Sigma_{\text{и}} = f(Q)$ (I способ) и по частным кривым $\Sigma_{\text{и}} = f(Q)$ для различных фаз водного режима лет разной водности (II способ)

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	По- ло- водье	Ме- же- нь	Год
$\Sigma_{\text{иI}}$	400	402	376	306	249	233	238	264	316	337	344	380			
$\Sigma_{\text{иII}}$	392	380	357	341	254	229	220	237	292	319	326	361	247	349	271
$\Sigma_{\text{иI}} - \Sigma_{\text{иII}}$	-8	-22	-19	+35	+5	-4	-18	-27	-24	-18	-18	-19			

Отличия в общей минерализации воды в разные фазы водного режима лет различной водности достаточно существенны (табл. 3). Максимум минерализации на подъеме половодья наблюдается в многоводные годы, минимум — в маловодные (при равных расходах). Минерализация воды лет средней водности занимает промежуточное положение. Аналогичное соотношение характерно для фазы спада и межени. Особенно высокой минерализацией отличаются расходы воды в начале половодья многоводных лет. По-видимому, в этот период, как отмечалось и Буркальцевой [6], происходит вымывание солей, накопленных в почво-грунтовой толще низкогорной зоны.

При больших расходах различия в сумме ионов на подъеме и спаде половодья, естественно, стираются.

Поскольку целью данной работы является изучение направленности изменения в многолетии (тренда) минерализации речной воды, учет фазовых различий необходим лишь в том случае, если использование осредненной кривой (рис. 1) значительно искажает этот тренд. Однако среднее за десятилетие внутригодовое распределение минерализации воды р. Нарын, рассчитанное по осредненной кривой (I способ), и с учетом фаз стока и степени водности каждого года десятилетки (II способ) близки (табл. 4), и необходимость в применении II способа для нашей задачи отпадает.

Очевидно, что при решении гидрохимических задач для интер-

валов времени, меньших 5—10 лет, учет степени водности и фаз водного режима становится необходимым.

Вывод об отсутствии тренда в многолетних колебаниях среднегодовой минерализации воды в области формирования стока позволяет считать наиболее перспективной моделью для описания колебаний стационарный случайный процесс.

Способы подсчета общей минерализации и некоторые черты ее режима в области «рассеивания» стока

Установленные выше фазовые различия $\Sigma_{\text{и}}$ речной воды горной территории необходимы для уточнения методики расчетов минерализации в области рассеивания стока, где гидрохимический режим формируется как под влиянием естественных, природных условий, так и под воздействием антропогенных факторов, в первую очередь орошения и мелиорации. Очевидно, что вниз по течению реки вклад первых уменьшается; хозяйственная же деятельность становится определяющей для гидрохимического режима реки и его показателей.

Совместное воздействие природных и антропогенных факторов на минерализацию речной воды в области рассеивания приводит кособой сложности гидрохимического режима, полноценное исследование которого еще в большей степени, чем для горной территории, осложняется крайней скудностью исходных данных.

Изменение общей минерализации анализировалось в четырех створах на р. Сырдарье: Каль — центр Ферганской долины, Бекабад — замыкающий створ этой долины, Кокбулак — важнейший створ, замыкающий среднее течение реки, и Казалинск — нижнее течение. К этим створам приурочены основные водохозяйственные расчеты. Показатели комплекса водохозяйственных мероприятий (размер орошаемых площадей, густота коллекторно-дренажной сети, водозабор и т. д.) на площади, замыкаемой каждым створом, существенно различны. Эти различия минимальны в начале исследуемого периода и достигают максимума в конце его.

Сток р. Сырдарьи регулируется рядом водохранилищ, крупнейшие из которых Кайраккумское (введено в эксплуатацию в 1957 г.) и Чардаринское (1967 г.) осуществляют сезонное регулирование. Заканчивается строительство Чарвакского водохранилища на р. Чирчик, строящегося для многолетнего регулирования стока этого крупнейшего притока р. Сырдарьи.

Данные по минерализации воды в каждом створе объединялись за ряд лет, аналогично I способу при расчетах по рекам Нарын и Карадарье, с последующим осреднением $\Sigma_{\text{и}}$ по интервалам водности без учета фаз режима. Этот прием, как было показано выше для р. Нарын с естественным гидрохимическим режимом, позволяет выявить общую направленность изменения минерализации воды в многолетии. При этом, естественно, теряются некото-

рые интересные особенности режима и возможности оценки изменчивости минерализации и ее точности.

На рис. 3 приведены средняя многолетняя кривая $\Sigma_{и} = f(Q)$ для р. Нарын, зависимости минерализации воды от расходов в створе Бекабад и связь между $\Sigma_{и}$ в этих створах за разные периоды при одинаковой водности. Такой соосный график удобен для оценки многолетних изменений минерализации в двух створах. На

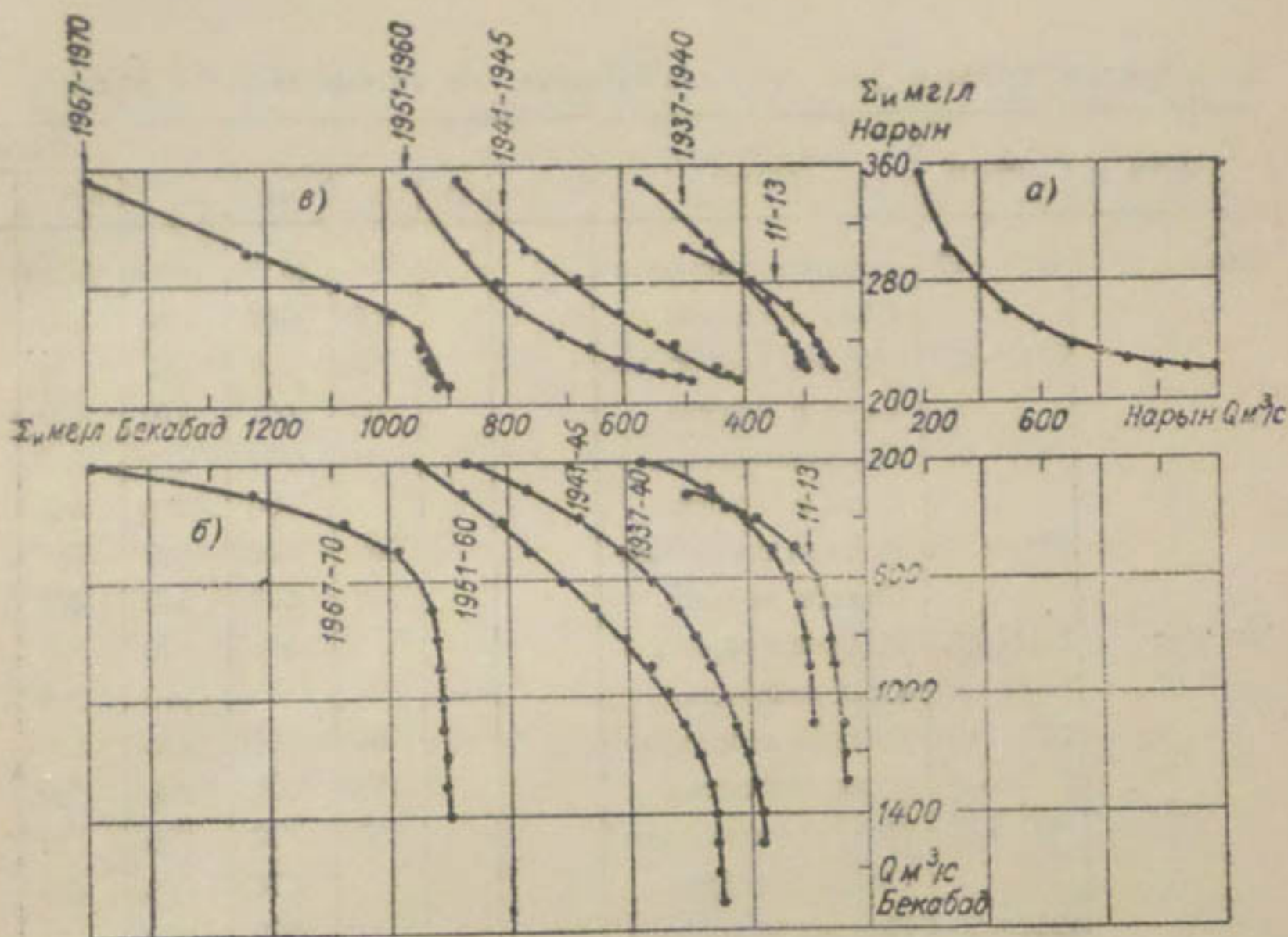


Рис. 3. Осредненные зависимости $\Sigma_{и} = f(Q)$ для р. Нарын (Учкурган) (а), р. Сырдарьи (Бекабад) (б) и связи между минерализацией воды в этих створах при равных расходах (в).

рис. 3 видно, что при неизменной в многолетии минерализации речной воды в горах (области формирования речного стока), в области рассеивания стока (створ Бекабад), минерализация воды, непрерывно нарастая во времени, увеличилась в три раза (с 320 мг/л в 1911—1913 гг. до 970 мг/л в 1967—1970 гг.) при $Q = 540 \text{ м}^3/\text{с}$. Последняя величина соответствует норме стока р. Сырдарьи (г. Бекабад) до начала массового развития орошения (1930—1940 гг.).

Таким образом, в многолетнем ходе минерализации воды в области рассеивания стока наблюдается четкий временной тренд; нарастание во времени минерализации здесь связано прежде всего

с увеличением заборов воды и доли возвратных вод в бытовом стоке реки [8], а также с трансформацией водных масс в водохранилищах. Для уточнения расчетов полезно выяснить, в какой мере сохраняются и изменяются в этой области закономерности гидрохимического режима, свойственные горной территории.

Анализ расположения точек на графиках связи измеренных, а не осредненных за ряд лет сумм ионов и расходов воды показы-

Координаты кривых $\Sigma_i = f(Q)$ для створов, расположенных в области

Створ	Период	Фаза водного режима	Q м³/с					
			100	150	200	300	400	500
Каль	1938—40	Подъем половодья				(575)	(500)	(425)
		Спад и межень			450	380	330	295
	1941—45	Подъем половодья			690	630	675	530
		Спад и межень			760	550	470	420
	1951—60	Подъем половодья				790	675	585
		Спад и межень				785	640	545
	1961—70	Подъем половодья			800	700	625	555
		Спад и межень			1040	695	545	475
Бекабад	1911—13	Подъем половодья				495	440	395
		Спад половодья					370	295
	1937—40	Подъем половодья			605	490	420	380
		Спад половодья			450	395	350	320
	1941—45	Подъем половодья			950	870	790	730
		Спад половодья				675	525	450
	1952—60	Подъем половодья				1070	850	795
		Спад половодья		935	865	740	650	585
1967—70	Подъем половодья					1360	1200	
	Спад половодья				1235	1045	950	
Кокбулак	1938—40	Подъем половодья	(630)	(550)	500	460	420	
		Спад половодья	(625)	(510)	(430)	(370)	(340)	
	1941—45	Подъем половодья			760	715	680	650
		Спад половодья	(850)		760	670	600	540
Кокбулак	1950—60	Подъем половодья				1000	880	790
		Спад половодья						
	1961—62	Подъем половодья			1300	1200	1125	1050
	1967, 1970	Спад половодья	(1320)		1210	1090	980	900
Казалинск	1911—13	Подъем половодья						(530)
		Спад половодья					425	330

вает, что различия в минерализации воды на подъеме и спаде по- ловодья ранее (1911—1913 гг.) наблюдались по всей длине реки (табл. 5). В последующие периоды в низовьях р. Сырдарьи эти различия нивелируются, однако в верхнем (Каль) и среднем (Бе- кабад, Кокбулак) течении сохраняются до настоящего времени. В нижнем течении, где степень ирригационно-мелиоративной транс- формации естественного гидрохимического режима наибольшая,

Таблица 5

рассеивания стока р. Сырдарьи (мг/л)

600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700
(380)	(350)	(330)	(315)	(305)	(300)						
265											
490	450	425		395		385					
390	320	355	340								
520	460	425		390		370					
475	435	400		360		340					
510	470	440		385		350					
435	410	390		365		345					
350	315	285		255		235					
270	260	250	240	235							
355	340	325	315	305		285					
300	285	275	270								
675	615	565	520	485				395		360	
405	365	330									
710	645	600	565	540	520	500		460			420
550	515	490	465	450							
1075	975	895	825	775	745						
870	795										
390	370	350	340	320		300	300				
(320)	(300)	(280)	(280)								
630	600	580	560	540		500			470		
500	480	460	450	440	430						
	870	790	730	670	620	580	540	520	500		
720	660	620	580	550	530	510	490	480	470		
990	920	870	820	780	750	730					
830	770	720									
(450)	(395)	(360)									
290	280	275									

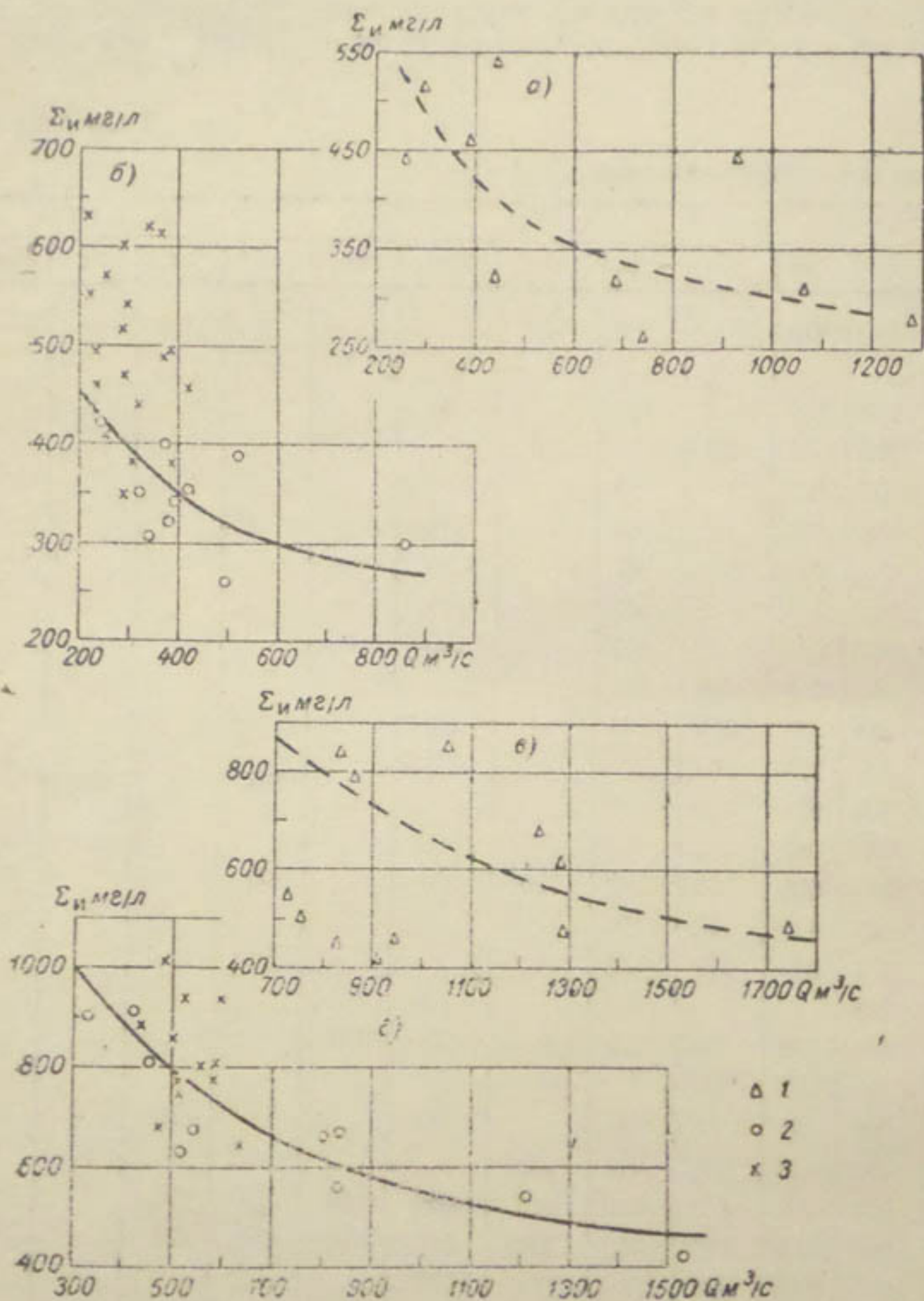


Рис. 4. Зависимость общей минерализации воды от расхода воды для разных фаз водного режима р. Сырдарьи.

Бекабад: а — подъем половодья, б — спад половодья; Кокбулак: в — подъем половодья, г — спад половодья; 1 — подъем, 2 — спад, 3 — межень.

в последние годы не обнаруживается и зависимость $\Sigma_{и} = f(Q)$ даже для периода половодья (рис. 5 в). Средняя минерализация воды в створе Казалинск за период половодья определялась простым осреднением измеренных значений $\Sigma_{и}$ (без учета водности).

Для подбора параметров зависимостей $\Sigma_{и} = f(Q)$ методика Г. А. Алексеева для рассматриваемых створов оказывается непри-

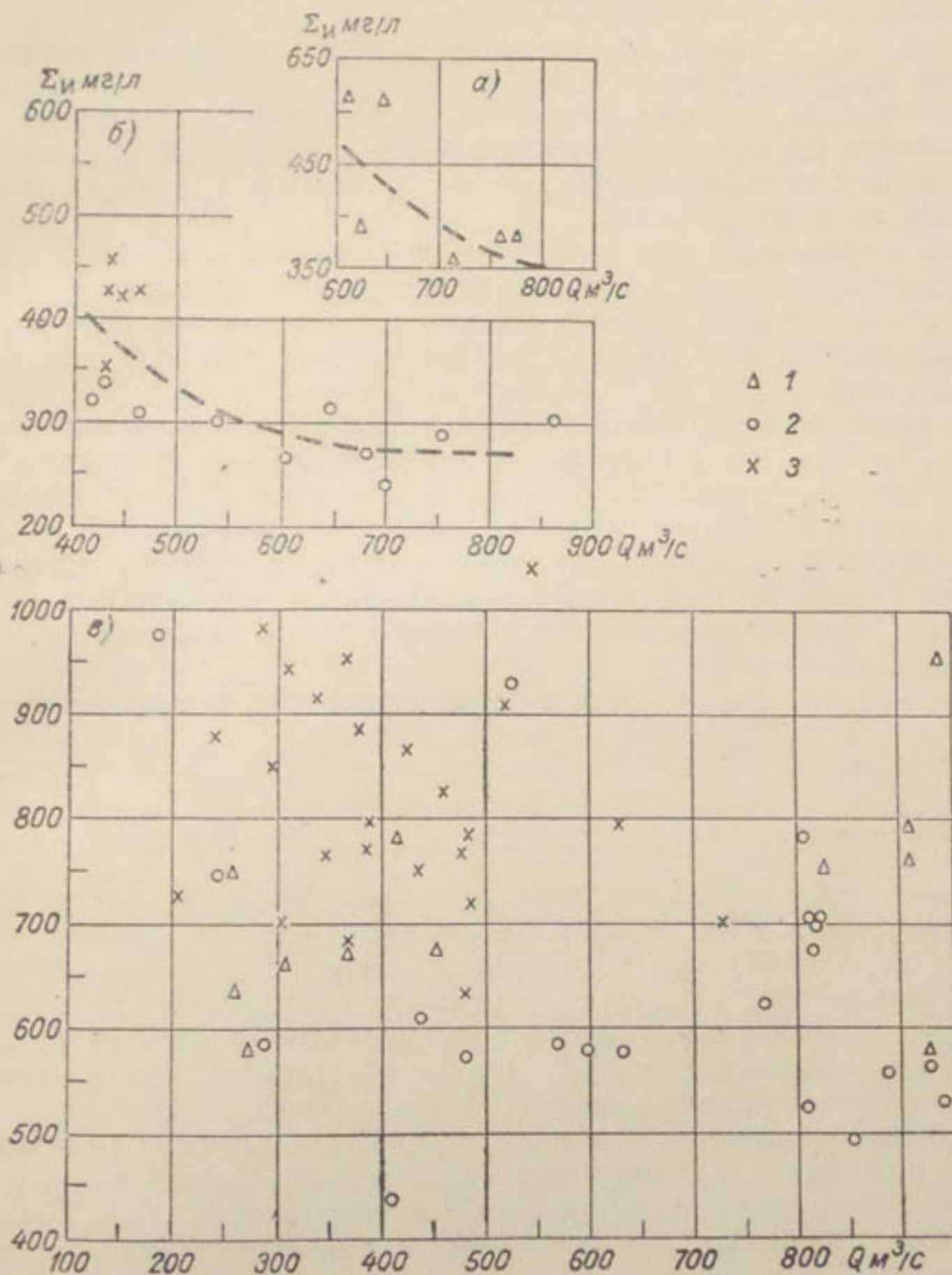


Рис. 5. Зависимость общей минерализации воды от расхода воды для разных фаз водного режима р. Сырдарьи в створе Казалинск за 1911—1913 гг. (а — подъем половодья, б — спад половодья) и за период 1951—1960 гг. (в).

1 — подъем, 2 — спад, 3 — межень.

меннмой из-за очень неравномерного распределения эмпирических точек по различным градациям водности. Поэтому подбирались параметры уравнений типа $\Sigma_{и} = A(Q)^{-n}$, либо проводилось графическое сглаживание осредненных по интервалам водности значений минерализации. Примеры кривых $\Sigma_{и} = f(Q)$ для створов Бекабад и Кокбулак изображены на рис. 4.

Координаты кривых $\Sigma_{и} = f(Q)$ для периодов подъема и спада половодья приведены в табл. 5.

Интересен тот факт, что различия в ординатах кривых в створе Каль во времени уменьшаются, а в створах Бекабад и Кокбулак увеличиваются. Это обстоятельство, по-видимому, — следствие регулирования стока водохранилищами. Накопленная за зимнюю межень вода повышенной минерализации повышает сумму ионов в период подъема половодья.

Малочисленность исходных данных и наличие некоторого тренда минерализации даже в пределах расчетных периодов не позволяют оценить характеристику изменчивости и степень случайного рассеивания величин $\Sigma_{и}$ относительно кривых $\Sigma_{и} = f(Q)$ для конкретных лет.

В период межени естественный режим минерализации настолько сильно искажается поступлением возвратных вод, попусками из водохранилищ, концевыми сбросами из каналов, что зависимость $\Sigma_{и} = f(Q)$ сохраняется лишь в верхнем течении Сырдарьи (п. Каль), а в среднем и нижнем практически исчезает. Средняя минерализация воды в эту фазу гидрологического режима определялась простым осреднением измеренных за расчетный период значений суммы ионов.

Для оценки изменчивости и определения границ колебаний минерализации за меженный период рассчитывалось среднее квадра-

тическое отклонение $\sigma_{\Sigma_{и}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Sigma_{и} - \bar{\Sigma}_{и})^2}{n}}$. Эта же величина оп-

ределена и для створа Казалинск, где средняя за половодье и межень минерализация определялась также простым осреднением. Для этого створа за период 1951—1960 гг. оказалось возможным в силу относительно большого числа точек (33 за межень и 45 за половодье) проверить гипотезу о виде закона распределения величины $\Sigma_{и}$. Эта процедура, выполненная при помощи статистического критерия $n\omega^2$ на 5%-ном уровне значимости [11], показала применимость нормального закона, хотя в эмпирической гистограмме прослеживается некоторая положительная асимметрия. Пользуясь широко известными таблицами нормального распределения [11], можно определить полезные для инженерных расчетов характеристики. В табл. 6 (для примера) приведены некоторые из них: интервал $\bar{\Sigma}_{и} \pm 1,64 \sigma_{\Sigma_{и}}$, в пределах которого будет находиться $\Sigma_{и}$ с вероятностью 0,9, а также $\Sigma_{и}$ 1%-ной обеспеченности. Первую характеристику можно трактовать так: в среднем в 90% продолжительности фазы (половодья или межени) минерализация воды не превы-

Статистические характеристики минерализации воды р. Сырдарьи в створах Бекабад и Казалинск

Створ	Период	Фаза водного режима	$\bar{\Sigma}_{\text{H}}$ мг/л	C_{V}	$\sigma_{\Sigma_{\text{H}}}$ мг/л	$\Sigma_{\text{H}} \pm 1,64$ $\sigma_{\Sigma_{\text{H}}}$ мг/л	$\Sigma_{\text{H}} - 1,64$ $\sigma_{\Sigma_{\text{H}}}$ мг/л	Фактические значения		$\Sigma_{\text{H}} 1\%$ мг/л
								максимальные	минимальные	
Бекабад	1911—13	Межень	508	0,16	70	623	393	602	385	670
	1937—40	Межень	498	0,17	86	639	357	632	349	699
	1941—45	Межень	764	0,23	181	1061	467	1136	519	1186
	1952—60	Межень	824	0,16	132	1040	608	1000	625	1132
	1967—70	Межень	1140	0,14	162	1405	874	1411	894	1517
Казалинск	1943, 1945, 1950	Год	605	0,15	152	854	356	879	409	959
	1951—60	Подъем и спад половодья	632	0,25	157	889	374	980	435	998
		Межень	812	0,19	154	1064	560	1419	583	1170
	1961—70	Подъем и спад половодья	1085	0,17	183	1385	785	1326	714	1511
		Межень	1108	0,26	283	1572	644	1628	590	1767

сит указанные пределы и лишь в 5% времени превысит $\bar{\Sigma}_n$ и $+1,64\sigma_{\Sigma_n}$, а в 5% времени будет меньше $\bar{\Sigma}_n - 1,64\sigma_{\Sigma_n}$.

Величина общей минерализации 1%-ной обеспеченности равна $\bar{\Sigma}_n + 2,33\sigma_{\Sigma_n}$. Такая минерализация может наблюдаться в реке крайне ограниченный промежуток времени (1% от продолжитель-

Таблица 7

Общая минерализация воды р. Сырдарьи в зависимости от водности и фазы режима

Створ	Период осреднения	Межень			Половодье			Год	
		Σ_n мг/л	Q м ³ /с	число проб	Σ_n мг/л	Q м ³ /с	число проб	Σ_n мг/л	Q м ³ /с
Каль	1938—40	424	260	6	387	474	7	400	367
	1941—45	573	286	16	471	581	28	504	434
	1951—60	626	383	43	461	821	45	513	602
	1961—70	749	294	25	558	547	28	626	420
Бекабад	1911—13	508	365	15	277	690	18	356	528
	1937—40	498	311	21	430	528	23	456	419
	1941—45	764	372	25	576	692	25	642	532
	1952—60	824	474	19	563	694	45	690	640
Кокбулак	1967—70	1140	418	12	998	776	14	1047	597
	1938—40	521	397	10	375	555	10	436	476
	1941—45	699	500	11	445	904	24	535	702
	1951—60	823	636	12	692	952	22	744	794
Казалинск	1961, 1962, 1967, 1970	1020	387	8	965	411	4	1000	393
	1911—13	481	323	6	386	569	14	420	446
	1937—38	—	—	—	—	—	—	(471)*	—
	1943, 1945, 1950	—	—	5	—	—	10	605	453
	1951—60	812	428	33	632	666	45	705	547
	1961—70	1110	290	16	1085	348	15	1095	319

* По данным работы [5].

ности фазы); ее появление свидетельствует об экстремальных условиях формирования минерализации воды.

Вместе с увеличением (во многолетии) $\bar{\Sigma}_n$ в межень увеличивается и ее изменчивость; в последние два периода σ возросло примерно в 2 раза. Заметно также резкое увеличение изменчивости минерализации воды в створе Казалинск за последнее десятилетие.

Различия в минерализации воды р. Сырдарьи в годы различной водности не обнаруживаются ни в одном из ее створов. Этот факт, помимо малочисленности данных, объясняется мощным задушевающим влиянием возвратных вод.

Пользуясь данными табл. 5 и данными по стоку в соответствующих створах, нетрудно рассчитать среднюю минерализацию речной воды за половодье, межень и год. Эти материалы для каждого из четырех створов приведены в табл. 7.

Данные ее показывают, что величины минерализации воды р. Сырдарьи, определенные приближенным и более точным способом, очень близки. Так, если по приближенным (осредненным) кривым Σ в створе Бекабад увеличилось с 320 мг/л (1911—1913 гг.) до 980 мг/л (1967—1970 гг.), то по уточненным данным эти величины составили соответственно 356 и 1057 мг/л.

Анализируя данные табл. 7, нужно помнить, что они относятся к интервалам 3—10 лет, водность которых значительно меняется, т. е. изменение средней минерализации от периода к периоду вызвано не только водохозяйственным использованием стока, но и колебаниями водности. Из данных этой же таблицы следует, что относительное увеличение минерализации воды в половодье во времени больше, чем в межень, что, как уже отмечалось, связано с регулированием стока водохранилищами.

Влияние возвратных вод на общую минерализацию воды р. Сырдарьи

Мелиоративные условия территории, дренируемой рекой и коллекторами, ландшафтно-геохимические особенности (в первую очередь уровень засоления земель), минерализация воды притоков создают довольно сложную картину изменения средней за период минерализации воды р. Сырдарьи от створа к створу.

Общие черты изменения суммы ионов по реке следующие. На участке от створа Каль до створа Бекабад минерализация воды во все периоды и фазы повышается, в нижерасположенных створах она остается практически неизменной. Эта неизменность есть следствие противоположных воздействий увеличения доли возвратных вод в бытовом стоке вниз по течению и впадения слабоминерализованных вод рек Ахангаран и Чирчик (по данным работы [8], $\bar{\Sigma}_{II}$ этих водотоков составляет 0,34 и 0,29 г/л).

В створе Кокбулак в последний период, а в створе Казалинск во все периоды четко прослеживается уменьшение расходов, вызванное ростом безвозвратных потерь стока на вновь осваиваемых под орошение землях.

Для расчетов и прогнозов общей минерализации в зоне рассеивания стока важно установить зависимость ее от доли возвратных

вод в бытовом стоке реки. Использование этой зависимости рационально, потому что возможна оценка в перспективе доли возвратных вод, исходя из планируемых мероприятий по изменению забора воды, к.п.д. оросительных систем, ввода новых орошаемых площадей и тем самым структуры водного баланса территории на расчетные водохозяйственные уровни. Попытка такого прогноза для Голодной степи дана, в частности, в работе [9]. На основании данных о доле возвратных вод и их минерализации в перспективе возможен ориентировочный прогноз минерализации речной воды.

Доля возвратных вод в стоке Сырдарьи при выходе ее из Ферганской долины (г. Бекабад) и на границе с нижним течением (ст. Кокбулак) оценивалась исходя из следующего. Отток из Ферганской долины y_0 осуществляется только поверхностным путем и складывается из транзитного стока Сырдарьи и ее притоков (T) и возвратного стока, сформировавшегося в пределах орошаемых массивов и поступающего как по коллекторной сети, так и непосредственно в русло ($y_{\text{воз}}$). Русловая компонента возвратного стока не измеряется, поэтому общий объем возвратных вод приходится рассчитывать по гидрометрическим данным

$$y_0 = T + y_{\text{воз}}, \quad (2)$$

где T — транзитный сток, равный

$$T = y_{\text{п}} - y_{\text{вод}} - P; \quad (3)$$

где $y_{\text{п}}$ — суммарный поверхностный приток; $y_{\text{вод}}$ — водозабор-брутто; P — потери стока в русле.

Пренебрегая из-за малости величиной P , можно записать балансовое уравнение для определения возвратного стока из Ферганской долины по гидрометрическим данным

$$y_{0, \text{ Бекабад}} = y_{\text{п}} - y_{\text{вод}} + y_{\text{воз}}. \quad (4)$$

По такому же принципу составляем уравнение для определения возвратного стока в створе Кокбулак

$$y_{0, \text{ Кокбулак}} = (T + y_{\text{воз}}) - y_{\text{вод}}^* + (T' + y_{\text{воз}}') + y_{\text{воз}}^*, \quad (5)$$

где T , $y_{\text{воз}}$, T' , $y_{\text{воз}}'$ — транзитный и возвратный сток соответственно из Ферганской долины и ЧАКИР; $y_{\text{вод}}^*$, $y_{\text{воз}}^*$ — забор воды в Голодную степь и измеренный возвратный сток из нее в р. Сырдарью.

Для створа Каль возвратные воды определены по графику связи расходов за 1955—1966 гг., заимствованных из работы [10], и рассчитанных по уравнению (4) расходов возвратного стока в створе Бекабад.

Данные о возвратном стоке (в % от годового) для этих трех створов помещены в табл. 8, а на рис. 6 даны зависимости среднегодовой минерализации воды р. Сырдарьи от доли возвратных вод в бытовом стоке реки.

Неоднозначность связи $\bar{\Sigma}_{\text{н}} = f(\alpha_{\text{воз}})$ вызвана тем, что минерализация возвратных вод при различной степени засоления почво-грунтов и доле сбросных вод (забранных из реки, но не использованных для орошения) может существенно изменяться.

Регулярные наблюдения за минерализацией возвратных вод в целом по ирригационному району пока не проводятся, поэтому важна их косвенная оценка по материалам руслового гидрохимического баланса. Можно записать следующее приближенное балансовое соотношение для каждого створа на р. Сырдарье

$$\bar{\Sigma}_{\text{н}} = \bar{\Sigma}_{\text{н}}'(1 - \alpha_{\text{воз}}) + \bar{\Sigma}_{\text{н воз}} \alpha_{\text{воз}}, \quad (6)$$

где $\bar{\Sigma}_{\text{н}}$ — средняя минерализация речной воды в створе, г/л; $\bar{\Sigma}_{\text{н}}'$ — средняя минерализация речной воды, поступающей из области формирования стока; $\bar{\Sigma}_{\text{н воз}}$ — средняя минерализация возвратных вод за расчетный период; $\alpha_{\text{воз}}$ — доля их (%) в годовом стоке за тот же период.

Необходимые для расчетов материалы помещены в табл. 8. Для сопоставимости расходы воды в створах определены за одинаковые периоды и потому несколько отличаются от приведенных в табл. 7.

Результаты приближенного косвенного определения минерализации возвратных вод показывают, что в створе Каль эта величина колеблется в пределах 1,1—1,6 г/л. В створе Бекабад увеличе-

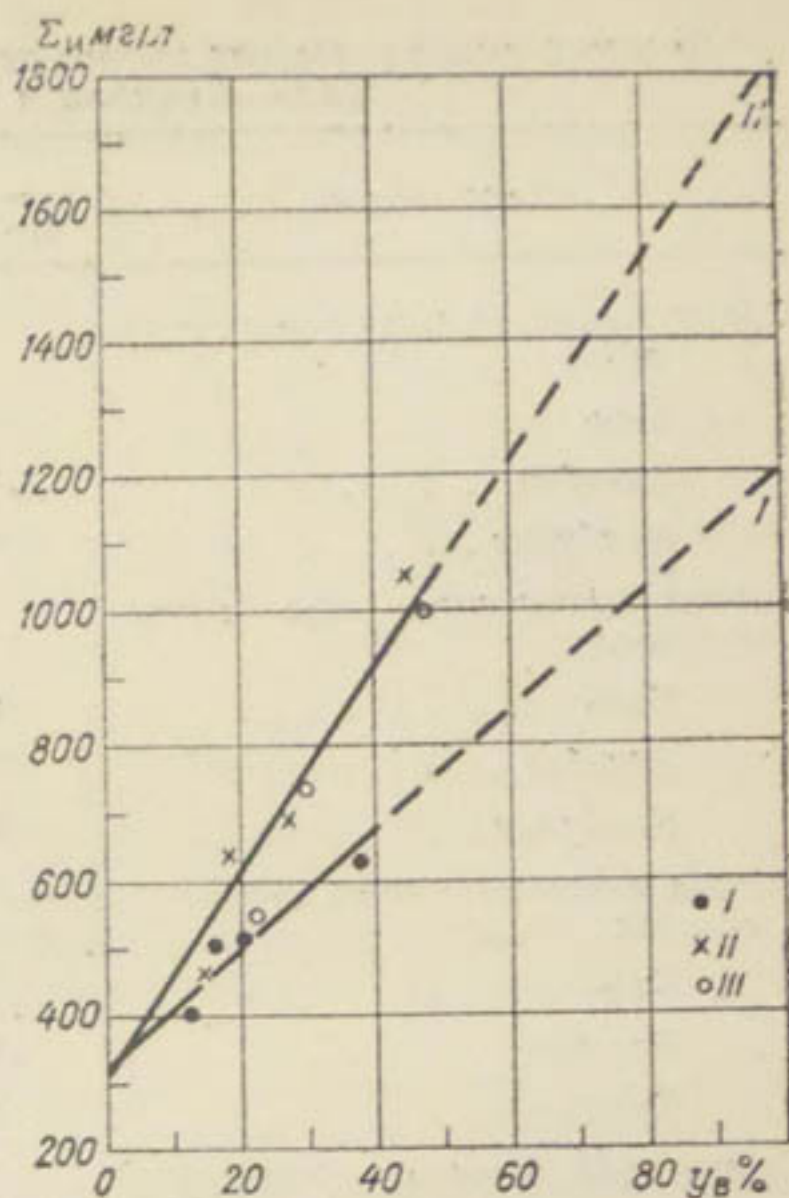


Рис. 6. Зависимость среднегодовой минерализации воды р. Сырдарьи от доли возвратных вод в бытовом стоке реки.

I — Каль, II — Бекабад, III — Кокбулак.

Подсчет минерализации возвратных вод р. Сырдарьи на участках
Каль—Бекабад и Бекабад—Кокбулак

Элемент расчета	Период осреднения, годы			
	1938—40	1941—45	1952—60	1967, 1968, 1970
Среднегодовой расход воды (м ³ /с) в створах:				
Каль	370	428	615	445
Бекабад	419	544	688	506
Кокбулак	471	699	949	632
Расход возвратных вод (м ³ /с) в створах:				
Каль	48	68	129	165
Бекабад	62	98	185	228
Кокбулак	66	167	275	304
Расход возвратных вод (%) в створах				
Каль	13	16	21	37
Бекабад	15	18	27	43
Кокбулак	14	23	29	48
Транзитный расход возвратных вод из Ферганской долины (расход в створе Бекабад за вычетом водозабора в Голодную степь), м ³ /с	54	86	163	164
Минерализация возвратных вод (г/л) в створах:				
Каль	1,07	1,58	1,31	1,20
Бекабад	1,34	1,97	1,74	1,85
Кокбулак	1,34	1,34	1,83	1,76
Расход ионного стока возвратных вод (кг/с) в створах:				
Каль	53	109	169	198
Бекабад	83	193	322	422
Кокбулак	89	224	504	535
Расход ионного стока транзитных возвратных вод из Ферганской долины, кг/с	72	169	284	303
Прирост возвратных вод (м ³ /с) на участках:				
Каль—Бекабад	14	30	56	63
Бекабад—Кокбулак	12	81	112	140

Элемент расчета	Период осреднения, годы			
	1938—40	1941—45	1952—60	1967, 1968, 1970
Прирост ионного стока возвратных вод (кг/с) на участках:				
Каль—Бекабад	30	84	153	224
Бекабад—Кокбулак	17	55	220	232
Минерализация возвратных вод (г/л) на участках:				
Каль—Бекабад	2,14	2,80	2,73	3,55
Бекабад—Кокбулак	1,42	0,80	1,97	1,65

ние минерализации возвратных вод происходит за счет дренирования земель Центральной Ферганы и прилегающих районов, отличающихся повышенной засоленностью; $\bar{\Sigma}_{\text{и воз}}$ возрастает до 1,3—2,0 г/л, а в последние 30 лет до 1,8—2,0 г/л. В створе Кокбулак $\bar{\Sigma}_{\text{и}}$ возвратных вод заметно отличается от $\Sigma_{\text{и}}$ для створа Бекабад лишь в 1941—1945 гг., а за три другие периода практически одинакова.

Интересно также, что какой-либо четкой направленности изменения во времени суммы ионов возвратного стока при описанном способе расчета не обнаруживается. Исключение составляет створ Кокбулак, где заметно некоторое возрастание (от 1,3 до 1,8 г/л) минерализации возвратных вод в два последних периода. Последнее, по-видимому, есть следствие увеличения возвратных вод из старой зоны орошения Голодной степи. Для прогнозирования целесообразно ориентироваться на данные 1952—1970 гг., по которым имеются наиболее надежные гидрометрические материалы, используемые для подсчетов возвратного стока.

Рассчитывая приращение расходов возвратных вод и их ионного стока для нижележащих створов, можно ориентировочно определить среднюю минерализацию возвратных вод, поступающих в русло реки на участках между узловыми створами (Каль—Бекабад, Бекабад—Кокбулак).

Возвратный сток в створе Кокбулак определен как сумма возврата ЧАКИРа и старой зоны Голодной степи и транзитного возвратного стока из Ферганской долины, представляющего собой разность между возвратным стоком в створе Бекабад и части его, изымаемой для орошения Голодной и Дальверзинской степей. При оценке последнего учитывались различия доли возвратных вод в стоке реки в вегетационный и невегетационный периоды.

Результаты расчетов общей минерализации возвратных вод на участках среднего течения р. Сырдарьи показывают, что увеличение $\Sigma_{\text{и воз}}$ в створе Бекабад (по сравнению со створом Каль) происходит за счет поступления возвратных вод с общей минерализацией, возрастающей от 2,1 г/л в 1938—1940 гг. до 3,6 г/л в 1967—1970 гг. Повышенная минерализация возвратных вод по-

следнего периода может быть следствием освоения все более тяжелых в мелиоративном отношении земель (Центральная Фергана).

ВЫВОДЫ

1. Ординаты зависимостей $\Sigma_{и} = f(Q)$ в области формирования речного стока (горная территория) различны для фаз подъема половодья, спада и межени в годы повышенной, средней и пониженной водности.

2. Для расчетов среднего значения общей минерализации речной воды и оценки изменения этой величины в многолетии допустимо использование кривых $\bar{\Sigma}_{и} = f(\bar{Q})$, построенных по их осредненным значениям за 5—10 лет.

3. Какого-либо направленного изменения (тренда) в многолетии (1911—1970 гг.) минерализации воды р. Сырдарьи в области формирования стока не отмечено. Таким образом, изменение среднегодовой минерализации воды в многолетний период можно рассматривать как стационарный случайный процесс.

4. Для четырех створов, расположенных в области «рассеивания» стока р. Сырдарьи, за тот же период выявлено непрерывное увеличение суммы ионов (в 1911—1970 гг.), которое является следствием комплекса водохозяйственных и мелиоративных мероприятий. В створе Бекабад, замыкающем Ферганскую долину, общая минерализация за год увеличилась от 0,36 г/л в 1911—1913 гг. до 1,05 г/л в 1967—1970 гг.

5. Для всех створов (кроме створа Каль) в зоне «рассеивания» стока в меженный период зависимость минерализации от расхода не обнаружена. Для периодов подъема и спада половодья ординаты кривых $\Sigma_{и} = f(Q)$ различны, в нижнем течении р. Сырдарьи (створ Казалинск) связь между $\Sigma_{и}$ и расходом воды не выявляется и в половодье.

6. Установлены четкие зависимости среднегодовой минерализации воды р. Сырдарьи в трех узловых водохозяйственных створах от доли возвратных вод в стоке реки в каждом створе. По уравнению руслового гидрохимического баланса рассчитана приближенная величина средней минерализации возвратных вод. За 1952—1970 гг., когда качество гидрометрических данных, по которым определяются возвратные воды, улучшилось, средняя их минерализация в створе Каль составила 1,20—1,31 г/л, в створах Бекабад и Кокбулак — 1,74—1,85 г/л.

7. Изменение среднегодовой минерализации речной воды в области «рассеивания» стока есть результирующая многих процессов, из которых важнейшими являются следующие: 1) естественные колебания минерализации речной воды (в области формирования стока), используемой для орошения; 2) увеличение забора воды из реки и затрат стока, вследствие чего водность реки в нижерасположенных створах убывает; 3) изменение объемов воз-

вратных вод и их доли в бытовом стоке реки. Последний показатель, комплексно учитывающий оба антропогенных процесса, представляется наиболее приемлемым для прогнозирования минерализации речной воды на перспективу.

8. Поскольку антропогенные процессы имеют четкий временной тренд, приемлемой следует считать модель нестационарного случайного процесса.

Возможность применения такой модели и повышения точности и обоснованности гидрохимических расчетов диктует необходимость значительного увеличения частоты отбора проб в узловых водохозяйственных створах и перенесения «центра тяжести» гидрохимических наблюдений с области формирования стока в область его «рассеивания».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев Г. А. Объективные методы выравнивания и нормализации корреляционных связей. Л., Гидрометеониздат, 1971. 363 с.
2. Алекин О. А. К изучению количественных зависимостей между минерализацией, ионным составом и водным режимом рек СССР.— «Тр. ГГИ», 1950, вып. 25(79), с. 25—36.
3. Алекин О. А. Гидрохимический режим р. Амударьи.— «Тр. ГГИ», 1951, вып. 33(87), с. 5—25.
4. Беремжанов Б. А., Ибрагимов А. И., Ибрагимова М. А. К вопросу химической характеристики р. Сырдарьи. Сообщение 1. Характеристика притоков среднего течения р. Сырдарьи.— Сборник МВ и ССО КазССР, «Химия и химическая технология», 1970, вып. 10, с. 58—70.
5. Беремжанов Б. А., Ибрагимов А. И., Ибрагимова М. А. Физико-химические исследования воды рек Сырдарьинского бассейна.— Вестник АН КазССР, 1972, № 6(326), с. 42—65.
6. Буркальцева М. А. К методике построения зависимостей для подсчета химического стока горных рек.— «Вопросы гидрологии», 1965, вып. 2, с. 119—125.
7. Караушев А. В., Скакальский Б. Г. Актуальные проблемы исследования качества поверхностных вод.— «Метеорология и гидрология», 1973, № 10, с. 73—81.
8. Лазарев К. Л., Якушева А. С., Манихина Р. К. Ожидаемые изменения минерализации и относительного состава воды в бассейне р. Сырдарьи после зарегулирования стока (на уровне 1980 г.).— «Гидрохимические материалы», 1965, т. 40, с. 46—59.
9. Рубинова Ф. Э., Геткер М. И. Водный баланс Голодной степи, изменение его структуры под влиянием водохозяйственного строительства в современных условиях и перспективе.— См. настоящий сборник.
10. Светицкий В. П. Ресурсы возвратных вод р. Сырдарьи.— «Тр. САНИИРИ», 1971, вып. 123, с. 135—184.
11. Смирнов Н. В., Дунин-Барковский И. В. Курс теории вероятностей и математической статистики. М., 1965. 511 с.
12. Фадеев В. В., Тарасов М. Н., Павелко В. Л. Исследование взаимосвязи между минерализацией, ионным составом и водным режимом рек в условиях избыточного увлажнения.— «Гидрохимические материалы», 1971, т. 56, с. 19—30.
13. Шульц В. Л. Реки Средней Азии. Л., Гидрометеониздат, 1965, 691 с.