

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ ТА НАУКИ УКРАЇНИ  
ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ЕКОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

***МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ***

ДО ВИВЧЕННЯ КУРСУ ТА ВИКОНАННЯ ПРАКТИЧНИХ  
ЗАВДАНЬ З ДИСЦИПЛІНИ  
“ АНТРОПОГЕННА ГІДРОЛОГІЯ”

РОЗДІЛ

**«ОЦІНКА ВПЛИВУ ГОСПОДАРСЬКОЇ ДІЯЛЬНОСТІ НА СТІК  
СЕРЕДНІХ ТА ВЕЛИКИХ РІЧОК ТА ПОНОВЛЕННЯ ЇЙОГО ХАРАКТЕРИСТИК»**

Для студентів V курсу денної та VI курсу заочної форм навчання,  
магістерського рівня підготовки

Напрямок підготовки: Гідрометеорологія

Спеціальність: Гідрологія та гідрохімія

**ЗАТВЕРДЖЕНО**

на засіданні методичної комісії університету  
протокол № \_\_\_\_\_ від “ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2010р.

Одеса 2010

Методические указания к изучению курса и выполнению практических занятий по дисциплине «Антропогенная гидрология», раздел «Оценка влияния хозяйственной деятельности на сток средних и больших рек и восстановление его характеристик» для студентов V курса дневной и VI курса заочной формы обучения магистерского уровня подготовки. Направление подготовки: гидрометеорология. Специальность: гидрология и гидрохимия./ Авторы : Гопченко Е.Д., д.г.н., проф., Бояринцев Е.Л., к.г.н., доц., Сербов Н.Г.,к.г.н., доц. – Одесса, ОДЕКУ, 2010, - 52с.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Оглавление	3
1. Факторы хозяйственной деятельности	4
2. Возможные антропогенные изменения отдельных элементов водного баланса речных водосборов	6
3. Методические основы количественной оценки влияния хозяйственной деятельности на речной сток	9
3.1. Характеристика методов восстановления речного стока и оценки его антропогенных изменений	9
3.2. Определение момента начала влияния хозяйственной деятельности на речной сток	13
4. Статистические методы оценки влияния антропогенных факторов на речной сток	20
4.1 Общие положения	20
4.2. Метод оценки антропогенных изменений стока по естественному притоку из зоны формирования	24
5. Метод оценки антропогенных изменений стока по метеорологическим факторам	29
6. Метод гидрологической аналогии	31
7. Метод линейного тренда	33
8. Воднобалансовые методы учёта влияния антропогенных факторов на речной сток.	34
9. Оценка влияния водохранилищ на сток	39
9.1 Детальная схема расчёта	39
9.2 Упрощённая схема расчёта	47
9.3 Прогноз возможных изменений стока под влиянием водохранилищ	48
Литература	52

## 1. ФАКТОРЫ ХОЗЯЙСТВЕННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Современная хозяйственная деятельность подразделяется на следующие виды:

- 1) русловое регулирование;
- 2) орошаемое земледелие;
- 3) переброска стока;
- 4) промышленно-коммунальное и сельскохозяйственное водо - снабжение;
- 5) осушение болот и заболоченных земель;
- 6) лесозаготовка, или промышленное использование лесов;
- 7) агролесомелиорация ;
- 8) урбанизация;
- 9) рыболовство;
- 10) рекреация;
- 11) разработка карьеров и водоотлив из шахт;
- 12) прочие виды.

Гидрологические последствия хозяйственной деятельности определяются видом, масштабом и характером антропогенных факторов. По характеру влияния на водные ресурсы и гидрологический режим все факторы хозяйственной деятельности подразделяются на группы:

- 1) факторы, оказывающие основное влияние в результате непосредственного изъятия воды из русловой сети (промышленно-коммунальное и сельскохозяйственное водопотребление, переброска стока ) и практически не влияющие на условия формирования стока;
- 2) факторы оказывающие основное влияние на сток в результате преобразования русловой сети (водохранилища и пруды, выпрямление и обвалование русел и др.) ;
- 3) факторы, оказывающие основное влияние на условия формирования стока и соотношения между элементами водного

баланса в результате воздействия на поверхность водосбора (агротехнические мероприятия, осушение болот и заболоченных земель, урбанизация и др.);

4) факторы, оказывающие влияние на сток как в результате водозаборов из русловой сети так и в результате преобразования поверхности водосбора (орошаемое земледелие, эксплуатация подземных вод и др.);

5) факторы, связанные с непреднамеренными изменениями климата в результате:

– изменения влагооборота вследствие увеличения количества влаги, испаряемой с бассейнов, под влиянием хозяйственной деятельности и увеличения осадков;

– изменения газового состава атмосферы, в частности повышения концентрации  $\text{CO}_2$ .

## 2. ВОЗМОЖНЫЕ АНТРОПОГЕННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ОТДЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ВОДНОГО БАЛАНСА РЕЧНЫХ ВОДОСБОРОВ

Уравнение водного баланса замкнутого речного бассейна для годовых, сезонных и месячных интервалов времени в общем случае имеет вид

$$P - E - Q - Q_{\text{п\ddot{a}ц}} = \Delta S + \delta, \quad (2.1)$$

Где  $P$  - осадки;  $E$  - испарение;  $Q$  - поверхностный сток;  $Q_{\text{п\ddot{a}ц}}$  - подземный сток;  $\Delta S$  - изменение бассейновых запасов воды;  $\delta$  - невязка баланса. Все элементы водного баланса выражаются в среднем слое на всю площадь речного водосбора (мм) или в объемах ( $\text{м}^3$  или  $\text{км}^3$ ).

Величина  $\Delta S$  представляет собой сумму изменений запасов воды в сезонном снежном покрове  $\Delta S_{\text{н\ddot{a}}}$ , наледях, ледниках и многолетних снежниках  $\Delta S_{\text{е\ddot{a}а\ddot{a}}}$ ; в озерах  $\Delta S_{\text{и\ddot{c}}}$ , в болотах  $\Delta S_{\text{а\ddot{т}\ddot{е}}}$ , в русловой сети  $\Delta S_{\text{д\ddot{o}н\ddot{е}}}$ , в зоне аэрации почвогрунтовой толщи  $\Delta S_{\text{а}}$  и в водоносных слоях  $\Delta S_{\text{а}}$ , дренируемых гидрографической сетью данной территории, т. е.

$$\Delta S = \Delta S_{\text{н\ddot{a}}} + \Delta S_{\text{е\ddot{a}а\ddot{a}}}$$

Воздействие комплекса факторов хозяйственной деятельности на элементы водного баланса речных водосборов может носить различный характер в зависимости от их вида и масштабов распространения на изучаемой территории, а также физико-географических условий речного бассейна.

Элементы водного баланса речного водосбора связаны между собой в гидрологическом цикле, поэтому изменения

суммарного испарения, аккумуляции воды в зоне аэрации, запасов грунтовых вод и т. д., обусловленные хозяйственной деятельностью. должны определенным образом сказаться на речном стоке. В свою очередь составляющие водного баланса водосбора зависят от изменения свойств подстилающей поверхности, ее водно – физических характеристик, альбедо, микрорельефа и др.

При использовании уравнения водного баланса для оценки изменения стока предполагается, что все его составляющие, за исключением осадков, могут быть подвержены антропогенному влиянию.

**Русловое регулирование** является ведущим фактором перераспределения стока и элементов водного баланса в разрезе года, а при многолетнем регулировании и в погодичном ходе. При многолетнем регулировании в первые годы заполнения водохранилищ величина  $\Delta S_{\text{допн}}$  может составлять несколько процентов годового стока, а в дальнейшем она уменьшается. Однако безвозвратные потери стока на дополнительное испарение с поверхности крупных водохранилищ или каскадов могут достигать 5% нормы стока. Дополнительное испарение существенно зависит от климатических условий (широтной поясности). В зоне избыточного увлажнения оно практически равно нулю, а в зоне сухих степей и пустынь -- максимально и может превышать испарение с суши в 3 – 10 раз. Влияние руслового регулирования на остальные элементы водного баланса речного водосбора невелико.

**Орошаемое земледелие** - мощный фактор истощения водных ресурсов, при большом развитии поливных земель в пределах речного водосбора может приводить к полному истощению водных ресурсов. Вместе с тем при развитии поливного земледелия в условиях перебросок стока водность рек –

реципиентов может возрасти. Например, сток рек Большого и Малого Узней, Большого Егорлыка при развитии орошения на базе перебросок возрос в несколько раз. Дополнительное испарение в бассейнах рек с орошаемых полей может составить десятки процентов его естественного значения.

В первые годы освоения орошаемых земель обычно заметен рост величины  $\Delta S$  за счет пополнения водой зоны аэрации почвогрунтов, водоносных слоев, а также заполнения прудов и водохранилищ. В последующие годы наблюдается снижение и установление величин  $\Delta S_{\dot{a}}$  и  $\Delta S_{\ddot{a}}$  на каком-то устойчивом уровне. При этом локальный сток с орошаемых полей может несколько увеличиться по сравнению со стоком с богарных площадей.

**Влияние промышленно – коммунального и сельскохозяйственного водоснабжения** на сток крупных рек не превышает 1% нормы, для средних рек может достигать нескольких процентов. Изменение других элементов водного баланса в зависимости от схемы использования водных ресурсов может быть различное. Однако для промышленно – коммунального водоснабжения в основном характерно наличие потерь стока на испарение при водоподаче от источника водозабора до водопользователей и при сбросе воды в гидрографическую сеть и в технологических процессах.

**При осушении болот и заболоченных земель** в период проведения мелиоративных работ и в течение 3-5 лет после их завершения в результате сработки вековых запасов грунтовых вод увеличение годового стока может составить до 15% его нормы. В зависимости от типа болот и характера их



сельскохозяйственного освоения после осушения испарение с осушенных земель может измениться в пределах  $\pm 10\%$ .

В результате **лесоэксплуатации** годовой сток средних рек может снизиться на 2 – 10%, межлетний - на 10 – 30%, а весенний сток может увеличиться 5 – 10%.

Влияние **агролесомелиорации** оценивается для крупных в пределах 1 – 6% нормы годового стока, для средних оно больше - до 25%. Кроме этого происходит перераспределение поверхностного и подземного стока в сторону некоторого увеличения последнего.

### **3. МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ ХОЗЯЙСТВЕННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ НА РЕЧНОЙ СТОК**

#### **3.1. Характеристика методов восстановления речного стока и оценки его антропогенных изменений**

Под восстановлением стока понимается приведение его характеристик к условиям хозяйственного освоения водосбора, соответствующим естественному (условно – естественному) периоду.

За естественный (условно – естественный) принят период от начала гидрометрических наблюдений, в течение которого ряды стока с определенной доверительной вероятностью являются однородными. Проверка однородности стоковых рядов должна выполняться на основе генетического анализа гидрометеорологической и водохозяйственной обстановки в бассейне и применения статистических методов.

Восстановление стока осуществляется согласно СН и ПУ 2.01.14 -83 двумя группами методов:

- регрессионными методами с использованием парной и множественной корреляции ;
- воднобалансовыми методами с учетом изменения всех элементов водного баланса речного водосбора и русла.

В основе первого подхода лежит представление о правомерности экстраполяции корреляционных связей между стоком и стокоформирующими факторами, полученных за естественный период, на период, нарушенный влиянием хозяйственной деятельности. При этом изменение стока оценивается по разнице между стоком, рассчитанным по уравнению регрессии, и измеренным в натуре.

В основе второго направления - воднобалансового - лежит анализ изменения элементов водного баланса под влиянием хозяйственной деятельности с применением принципа сохранения водных масс в гидрологическом цикле с учетом ландшафтно – географического подхода и безвозвратных потерь стока на хозяйственные нужды. При воднобалансовых расчетах вначале оцениваются изменения стока в рассматриваемом створе реки под влиянием отдельных видов хозяйственной деятельности, а затем по рассчитанным значениям антропогенных изменений стока и по данным наблюдений за стоком производится его восстановление.

Использование первого подхода затрудняется неустойчивостью корреляционных связей при использовании рядов наблюдений малой продолжительности. Регрессионные методы не позволяют в ряде случаев надежно выделить влияние на сток каждого фактора хозяйственной деятельности в отдельности, что ограничивает их использование для прогноза изменений стока.

Положительной стороной регрессионных моделей является их простота и быстрота расчетов суммарного воздействия комплекса водохозяйственных мероприятий на сток.

При воднобалансовом подходе имеется возможность дифференцированного учета влияния каждого фактора хозяйственной деятельности и их совместного влияния как в русловой сети, так и на водосборе. Воднобалансовые методы позволяют рассчитать не только происшедшие, но и ожидаемые в перспективе изменения водности рек.

Отрицательной стороной воднобалансовых методов является необходимость использования большого объема разнородной гидроклиматической и водохозяйственной информации, что затрудняет получение точных оценок антропогенного изменения стока.

Основой для воднобалансовых расчетов изменений стока под влиянием факторов хозяйственной деятельности, связанных с непосредственными изъятиями воды из русловой сети, являются данные по учету использования вод, проводимому органами Минводхоза в соответствии с „Положением о государственном учете вод и их использовании”. Для восстановления и оценки изменений стока под влиянием промышленно - коммунального и сельскохозяйственного водопотребления, перебросок стока при наличии данных о заборах и сбросах вод используется русловой водный баланс. Для надежного учета влияния на сток антропогенных факторов, связанных с преобразованием подстилающей поверхности водосбора, а также для бассейнов, где получили развитие компенсационные факторы (под компенсационными факторами понимаются антропогенные факторы, в результате которых происходит увеличение поверхностного или подземного притока в реки, или уменьшение суммарного

испарения с водосборов: увеличение поверхностного стока в результате повышенного увлажнения почвы на орошаемых территориях, снижение суммарного испарения в бассейне в результате уничтожения влаголюбивой дикорастущей растительности, уменьшения разливов рек и продолжительности затопления пойм и дельт, снижения уровней грунтовых вод и др.), использование только данных по водозаборам и сбросам является недостаточным. Недоучет этого может привести к значительным ошибкам при восстановлении и оценке изменений стока.

Выбор метода для оценки антропогенного изменения стока диктуется не только конечной целью – решить конкретную задачу по восстановлению стока и оценить его изменения под влиянием факторов производственной деятельности за многолетний период, конкретный год, месяц, сезон или получить гидрограф естественного стока, но в значительной мере определяется наличием исходной информации.

Во всех случаях, когда исходная информация достаточна для проведения исследований, обязательным является параллельное применение статистических и воднобалансовых методов. Окончательная оценка антропогенных изменений стока дается на основе сравнения результатов, полученных независимыми методами. Расхождение в оценках не должно превышать 20%. В противном случае необходим дополнительный анализ и, если необходимо, привлечение дополнительной информации.

В зависимости от физико–географических и водохозяйственных условий водосбора предпочтение следует отдавать различным методам.

Для зоны избыточного увлажнения использование обеих групп методов равноценно и дает более надежные результаты, чем для зоны недостаточного увлажнения и аридных районов.

В условиях засушливой зоны на равнинных реках Казахстана, Заволжья, юга России и Украины использование воднобалансовых методов для оценки изменения стока затрудняется его малыми значениями по сравнению со значениями осадков и испарения. Это может приводить к ошибкам оценок изменения, соизмеримым и даже превышающим само значение стока. регрессионные методы в этих условиях из-за большой изменчивости стока и недостаточной длительности рядов наблюдений за гидрометеорологическими характеристиками также дают менее надежные оценки.

Для рек, сток которых формируется в горах, а используется в равнинной части водосборов, предпочтительней использовать регрессионные методы, как наиболее простые, экономичные и достаточно надежные .

Для восстановления естественных гидрографов рек, зарегулированных водохранилищами, представляется перспективным применение математического моделирования .

### **3.2. Определение момента начала влияния хозяйственной деятельности на речной сток**

Определение начала нарушения водного режима под влиянием отдельных видов или всего комплекса факторов хозяйственной деятельности является задачей, предшествующей процедуре количественной оценки антропогенного изменения стока, так как в зависимости от установления «точки отсчета» на шкале времени в существенной мере зависит и величина расчетного изменения стока по годам и периодам под влиянием хозяйственной деятельности.

Установление момента (год, месяц) начала искажения естественного режима стока во многих случаях весьма затруднительно и неопределенно по следующим причинам:

а) установление момента начала воздействия ряда факторов хозяйственной деятельности, таких, как распашка земель, вырубка лесов, орошение засушливых земель, бывает затруднительным вследствие того, что они часто осуществляются на водосборе задолго до начала наблюдений за стоком. Таким образом, наблюденные стоковые ряды, даже наиболее продолжительные, как правило, относятся к периоду с нарушенным водным режимом. Исключением являются лишь целинно-степные, таежные и горные водосборы, где практически хозяйственная деятельность человека отсутствует;

б) второе не менее важное обстоятельство, затрудняющее достоверное определение момента нарушения водного режима, состоит в неодновременности возникновения разных видов хозяйственной деятельности. При этом одни виды могут уменьшать водные ресурсы, а другие увеличивать. В итоге совместного воздействия многих факторов хозяйственной деятельности, а также при наличии компенсационных факторов водные ресурсы некоторое время могут оставаться практически неизменными.

Для установления момента антропогенного нарушения водного режима используются три группы способов.

В первой группе способов оценки начала антропогенного влияния считается с момента появления того или иного крупного хозяйственного мероприятия, осуществляемого на водосборе или в русле реки.

Применение этого способа анализа начала нарушений гидрологического режима эффективно лишь в случае создания крупных межбассейновых перебросок стока, крупных водохранилищ, когда достоверно известны даты их ввод в эксплуатацию. Во всех остальных случаях этот способ должен использоваться как дополнительный.

В основе методического подхода второй группы способов определения начала антропогенного нарушения стока лежит принцип гидрологической аналогии, согласно которому в аналогичных природно-

климатических условиях процессы стока во времени и пространстве происходят аналогично. При этом при отсутствии хозяйственной деятельности в рассматриваемых бассейнах между стоком реки-аналога (рек-аналогов) и исследуемой реки должна быть тесная корреляционная связь  $R/\sigma_R \geq 2$ ,  $R > 0,80$ . Последняя нарушается, если в исследуемом бассейне с момента времени  $T$  начинает осуществляться активная хозяйственная деятельность. Момент нарушения определяется по интегральному графику связи

$$\sum_1^n Q = f\left(\sum_1^n Q_a\right), \quad (3.1)$$

где  $\sum_1^n Q$  - последовательная сумма годового (сезонного) стока реки в замыкающем створе, режим которой с момента  $T$  искажен влиянием хозяйственной деятельности;  $\sum_1^n Q_a$  - последовательная сумма годового (сезонного) стока реки-аналога, режим которой не искажен влиянием хозяйственной деятельности за весь период наблюдений. Начало нарушения гидрологического режима определяется по точке перелома в ходе кривой (рис.1).

Правильность графического определения момента нарушения гидрологического режима по связи (3.1) может быть подтверждена статистическим приемом анализа, который осуществляется следующим образом.

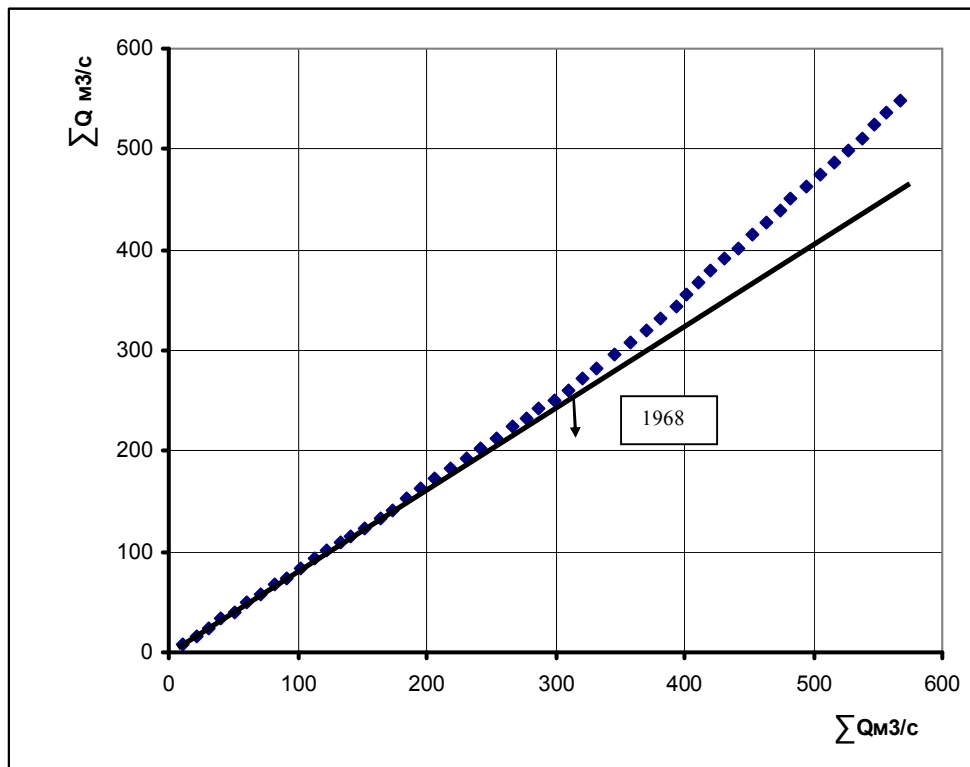


Рис. 1. График связи  $\sum_1^n Q = f(\sum_1^n Q_a)$ .

Рассчитывается за каждый год разница годового, сезонного стока исследуемой реки и реки-аналога  $\Delta = Q - Q_a$ . В случае нескольких рек аналогов определяется среднее значение стока  $\overline{Q_a} = (\sum_1^m Q_{am}) / m$ . Момент нарушения определяется по ряду  $\Delta$  для которого путем последовательного расчета отыскивается статистика:

$$z_T = T\sigma_T^2 + (N - T)\sigma_{N-T}^2, \quad (3.2)$$

где  $N$  – общее число членов ряда;  $\sigma_T^2$ ,  $\sigma_{N-T}^2$  – среднее квадратическое отклонение первой и второй части ряда  $\Delta$ ;  $m$  – число аналогов. Моменту нарушения стока соответствует минимальное значение статистики  $Z_T$ , определенной для ряда значений  $T$ , близких к моменту перелома, ориентировочно определенному по рис.1. Проверка однородности производится по критериям Фишера и Стьюдента.



К третьей группе способов определения начала антропогенного нарушения стока относятся методы, основанные на исследовании свойств временных стоковых рядов и стокоформирующих факторов с учетом развития хозяйственной деятельности в бассейне реки.

Антропогенное изменение водного режима оценивается путем графического анализа временных колебаний значений коэффициента индикации  $\alpha$  с учетом хода всех основных элементов водного баланса и хронологического хода характеристик хозяйственной деятельности. Для водосборов, на которых можно выделить зону формирования с естественными характеристиками стока, коэффициент индикации численно равен

$$\alpha = \frac{(\sum Q_{i\delta})}{Q_{\zeta\grave{\alpha}i}} , \quad (3.3)$$

где  $\sum Q_{i\delta}$  - характеристика притока из зоны формирования;  $Q_{\zeta\grave{\alpha}i}$  - сток в замыкающем створе.

Для равнинных водосборов средних рек, водные ресурсы которых формируются и используются на всей территории бассейна, коэффициент индикации равен обратной величине коэффициента стока

$$\alpha = P_{\grave{\alpha}i\grave{\alpha}} / Q_{\zeta\grave{\alpha}i} ; \alpha' = S + P_{\grave{\alpha}\grave{\alpha}\grave{\alpha}} / Q_{\zeta\grave{\alpha}i} , \quad (3.4)$$

где  $P_{\grave{\alpha}i\grave{\alpha}}$  - годовые осадки,  $S$  - максимальные снегозапасы,  $P_{\grave{\alpha}\grave{\alpha}\grave{\alpha}}$  - осадки за период весеннего половодья.

Достоверность определения момента нарушения стока проверяется воднобалансовыми и статистическими критериями. В качестве воднобалансового критерия принимается условие  $\overline{\alpha_{\grave{\alpha}\grave{\alpha}\grave{\alpha}}} < \overline{\alpha_{i\grave{\alpha}\delta}}$ . Статистическим критерием является оценка средних значений  $\overline{\alpha_{\grave{\alpha}\grave{\alpha}\grave{\alpha}}}$  и  $\overline{\alpha_{i\grave{\alpha}\delta}}$ . Если  $\overline{\alpha_{i\grave{\alpha}\delta}} > \overline{\alpha_{\grave{\alpha}\grave{\alpha}\grave{\alpha}}} \pm 2\sigma$ , то такое отклонение средних значений коэффициента носит не случайный характер.

Для рек, в бассейнах которых интенсивная хозяйственная деятельность началась задолго до инструментальных наблюдений за стоком, расчет коэффициента  $\alpha$  не позволяет оценить начало нарушения стока, так как во временном ходе коэффициента  $\alpha$  наблюдается тренд (рис.2). Наличие тренда во временном ходе коэффициента  $\alpha$  говорит о наличии монотонного влияния хозяйственной деятельности на сток и о невозможности установления надежных и корреляционных связей стока только с естественными факторами.

На реках с неискаженным, естественным водным режимом во временном ходе коэффициента  $\alpha$  тренд отсутствует, нет и скачков (рис. 2).

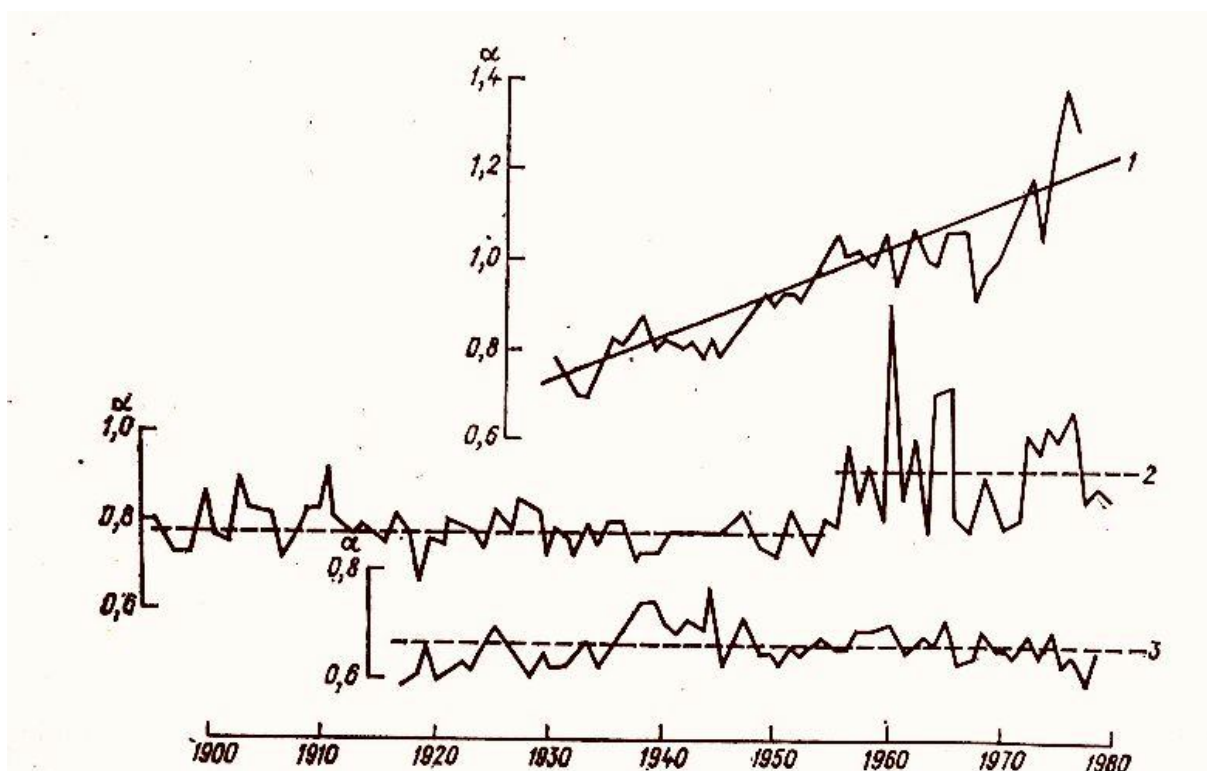


Рис. 2. Временной ход коэффициента индикации  $\alpha$  .

1. – р. Терек –ст-ца Каргалинская, 2 – Днепр – г. Каховка, 3.- Северная Двина – г. Усть – Пинега.

*Пример.* На рис. 3 приведен комплексный график с характеристиками годового стока р.Днепра у г.Каховка за период 1895-1979гг.: разностной

интегральной кривой (1), годовым стоком в замыкающем створе (2), интегральной кривой (3), притоком по сумме трех рек-индикаторов (4), ходом коэффициента индикации  $\alpha$  (5). Годы введения в эксплуатацию водохранилищ и каналов обозначены условными знаками.

На графике четко видны точки перелома: в ходе разностной интегральной кривой стока точка перелома приходится на 1942г.; в ходе интегральной кривой стока – на 1950 г. и ходе кривой коэффициента индикации – на 1956 г. Перелом в ходе кривых 1 и 3 отражает изменение водности за счет климатических причин, а перелом в ходе кривой 5 обусловлен только антропогенными факторами.

Достоверность определения момента нарушения стока по кривой 5 подтверждается статистическими и воднобалансовыми критериями.

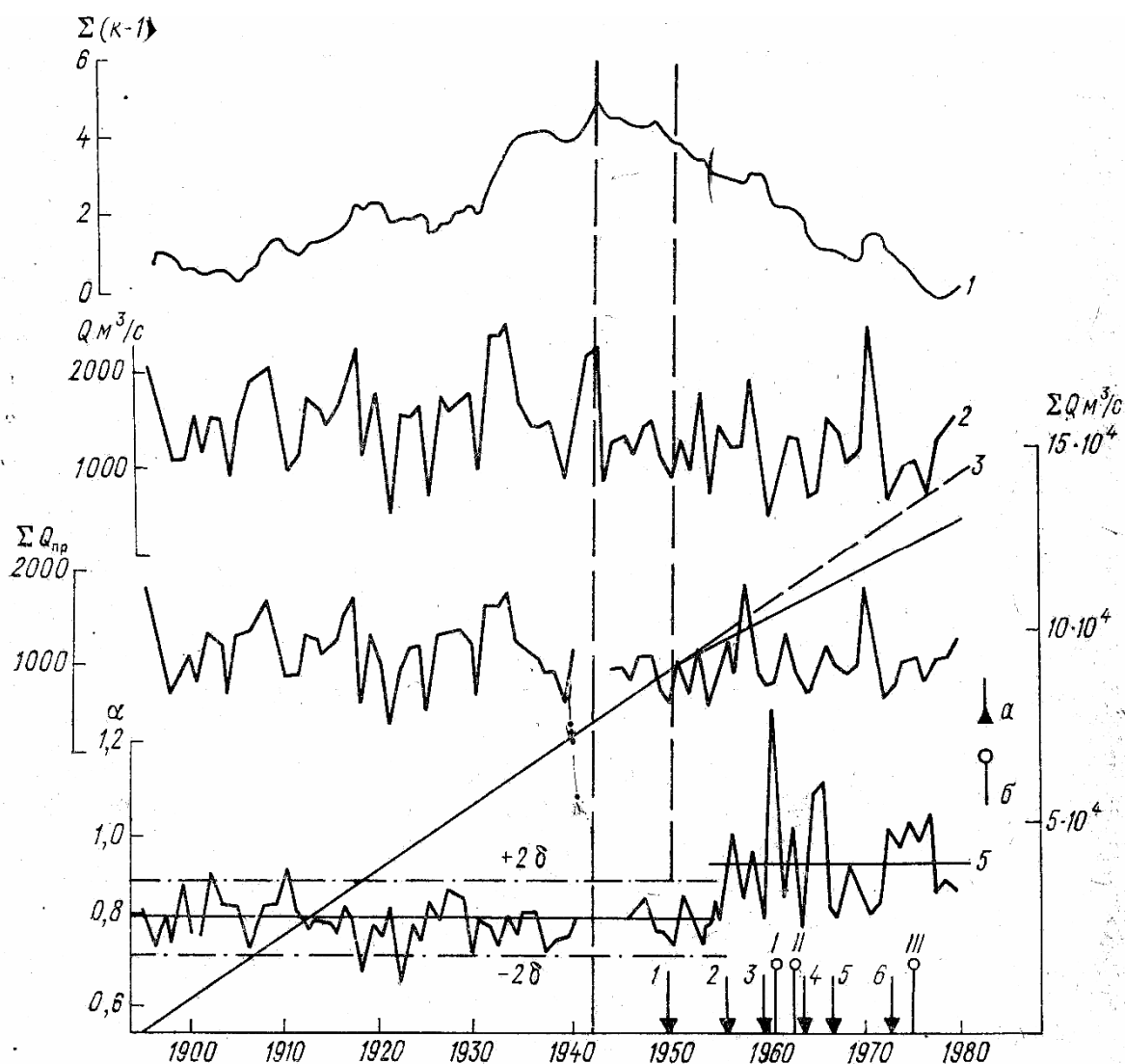


Рис. 3. Комплексный график хронологического хода гидрологических характеристик р. Днепра у г. Каховки за 1985 – 1980гг.

1 – разностная интегральная кривая годового стока; 2- сток в замыкающем створе (Q); 3- интегральная кривая стока; 4 – суммарный гидрограф притока по бассейнам – индикаторам ( $\sum Q_{i\alpha}$ ); 5 – коэффициент индикации ( $\alpha = (\sum Q_{i\alpha}) / Q$ ); а – год ввода водохранилища в эксплуатацию; б- год ввода в эксплуатацию канала.

## **4. СТАТИСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ АНТРОПОГЕННЫХ ФАКТОРОВ НА РЕЧНОЙ СТОК**

### **4.1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ**

При помощи статистических методов выполняется восстановление годового и сезонного стока рек и оценка его изменений под влиянием комплекса факторов хозяйственной деятельности. Расчет производится в следующей последовательности:

- за естественный (условно-естественный) период определяется зависимость стока от основных стокообразующих факторов;
- по найденной зависимости восстанавливается естественный сток за период с нарушенным водным режимом;
- по разности наблюдаемого и восстановленного стока оценивается его изменение под влиянием комплекса факторов хозяйственной деятельности.

Для определения зависимости стока от основных стокообразующих факторов по данным наблюдений используется метод парной и множественной линейной регрессии. В случае криволинейных зависимостей необходимо предварительно их линеаризировать.

В общем виде уравнение множественной линейной регрессии имеет вид

$$Q_{\text{анн}} = k_0 + k_1 X_1 + k_2 X_2 + \dots + k_n X_n, \quad (4.1)$$

где  $Q_{\text{анн}}$  - годовой (сезонный) сток за естественный (условно-естественный период);  $X$  - характеристика естественных факторов (приток из зоны формирования, сток рек-аналогов, осадки и др.);  $k$  - коэффициент регрессии;  $k_0$  - свободный член.

Ошибка уравнения регрессии определяется по формулам

$$\sigma_{Q_{\text{анн}}} = \sigma_{Q_{\text{аац}}} \sqrt{1 - R^2} \quad (4.2)$$

или

$$\sigma_{Q_{\text{анн}}} = \sqrt{\frac{\sum_1^n (Q_{i,p} - Q_{i,i})^2}{n - 1}}, \quad (4.3)$$

где  $\sigma_{Q_{\text{аац}}}$  - среднее квадратическое отклонение переменной  $Q$ ;  $R$  - коэффициент множественной (парной) регрессии;  $Q_{i,\delta}$ ,  $Q_{i,i}$  - рассчитанные и наблюдаемые значения стока.

Для восстановления стока в соответствии с рекомендациями [9] используются только те уравнения регрессии, для которых выполняются условия

$$R \geq 0,8; R/\sigma_R \geq 2; k_j/\sigma_{k_j} \geq 2, \quad (4.4)$$

где  $\sigma_R$  - средняя квадратическая ошибка  $R$ ,  $\sigma_{k_j}$  - средняя квадратическая ошибка  $k_j$ ;  $j=1 \dots m$ .

По уравнениям регрессии, удовлетворяющим условию (4.4), восстанавливается сток за период с нарушенным режимом; количественная оценка влияния комплекса факторов хозяйственной деятельности на сток

$(\Delta Q_{\delta i \zeta})$  определяется по разности между рассчитанным  $(Q_{\delta})$  и наблюдаемым  $(Q_i)$  стоком.

По результатам расчетов, выполненных по нескольким уравнениям регрессии, устанавливается расчетное снижение стока. При невозможности получения нескольких уравнений регрессии оценка антропогенных изменений стока производится по одному варианту.

Надежность расчета антропогенных изменений стока определяется тонностью определения его восстановленных значений и точностью исходных данных по стоку. Средняя квадратическая погрешность расчета величины  $\Delta Q_{\delta i \zeta}$  вычисляется по уравнению

$$\sigma_{Q_{\delta i \zeta}} = \sqrt{(\sigma_{Q_{\text{анн} \delta}}^2 + \sigma_{Q_i}^2) / n}, \quad (4.5)$$

где  $\sigma_{Q_{\text{анн} \delta}}$  - средняя квадратическая погрешность восстановления стока, определяемая по формуле (4.5) или (4.3);  $\sigma_{Q_i}$  - средняя квадратическая погрешность измерения расхода  $Q_i$ ;  $n$  - число лет в периоде, для которого определяется  $\Delta Q_{\delta i \zeta}$ .

Результаты оценки изменений стока  $\Delta Q_{\delta i \zeta}$  можно считать надежными, если их абсолютное значение значительно отличается от погрешности определения:

$$|\Delta Q_{\delta i \zeta}| \geq \alpha_D \sigma_{\Delta Q_{\delta i \zeta}}, \quad (4.6)$$

где  $\sigma_D$  - доверительный интервал погрешности расчета в долях ее среднего квадратического значения.

Величина  $\sigma_D$  зависит от доверительной вероятности  $P$ . При оценке надежности расчета  $\Delta Q_{\delta i \zeta}$  доверительная вероятность  $P$  принимается равной 0,95, тогда  $\sigma_P \approx 2$ .

При восстановлении речного стока по регрессионным уравнениям в среднем систематически приуменьшается размах колебаний рассматриваемой гидрологической характеристики по сравнению с ее наблюдаемыми значениями. Для исключения отмеченной систематической ошибки рекомендуется стандартное отклонение, рассчитанное по восстановленному ряду, делить на парный коэффициент корреляции в случае двух переменных или на коэффициент множественной корреляции в случае более двух переменных.

Систематическое приуменьшение дисперсии можно исключить также путем ее расчета по восстановленным рядам стока, откорректированным по формуле:

$$Q'_i = (\Delta Q_i) / R + \bar{Q} = (Q_i - \bar{Q}) / R + \bar{Q}, \quad (4.7)$$

где  $\Delta Q_i$  - отклонение значений стока, рассчитанных по уравнению регрессии, от среднего значения  $\bar{Q}$ , определенного за расчетный период.

Для восстановления и оценки изменения средних за многолетний период значений годового и сезонного стока допускается применение графических и графоаналитических способов расчета.

Если сток реки является нарушенным с самого начала инструментальных гидрометрических наблюдений, т.е. в его многолетних колебаниях в результате влияния хозяйственной деятельности прослеживается временной тренд, то для восстановления и оценки антропогенных изменений стока используются регрессионные зависимости, где в качестве аргумента наряду с естественным стокообразующими факторами входит фактор, комплексно характеризующий потери стока в бассейне на хозяйственные нужды. При этом сток восстанавливается по отношению к условиям хозяйственного освоения водосбора, соответствующим началу инструментальных

наблюдений за стоком. Для восстановления стока за весь период наблюдений может быть использован метод линейного тренда.

#### 4.2. МЕТОД ОЦЕНКИ АНТРОПОГЕННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ СТОКА ПО ЕСТЕСТВЕННОМУ ПРИТОКУ ИЗ ЗОНЫ ФОРМИРОВАНИЯ.

Метод используется для учета влияния хозяйственной деятельности на годовой и сезонный сток рек, в бассейнах которых можно выделить зону формирования и зону использования стока. К этой категории рек относятся:

-- реки южных районов РСФСР, зоной формирования которых является горная часть бассейнов, где сток не нарушен хозяйственной деятельностью, а зоной использования - его равнинная часть;

-- большие реки равнинных районов, сток которых формируется преимущественно в достаточно увлажненной лесной зоне, где антропогенные факторы не оказывают существенного влияния на водный режим, а безвозвратные потери стока на хозяйственные нужды имеют место в южной лесостепной и степной частях бассейна.

. Для восстановления и оценки изменений стока под влиянием хозяйственной деятельности используются следующие зависимости:

$$Q = f(Q_{i\delta}); \quad (4.8)$$

$$Q = f(Q_1, Q_2, \dots, Q_n, P, t); \quad (4.9)$$

$$Q = f(Q_{i\delta}, P, t, \delta i \zeta); \quad (4.10)$$

где  $Q_{i\delta}$  - характеристика суммарного притока из зоны формирования;  $Q_1, Q_2, \dots, Q_n$ , - годовой (сезонный) сток рек - индикаторов, расположенных в зоне формирования;  $P, t$  -



характеристики годовых (сезонных) осадков и температуры воздуха в зоне использования;  $\tilde{\delta i \zeta}$  - комплексный антропогенный фактор, характеризующий потери стока в бассейне на хозяйственные нужды.

Величина  $Q_{i\delta}$  рассчитывается путем суммирования годовых (сезонных) расходов воды основной реки и ее притоков, определенных по данным измерений для пунктов, расположенных в зоне формирования стока.

Величины  $P$  и  $t$  определяются как средние арифметические из данных пунктов, расположенных в зоне использования стока. Ряды наблюдений за осадками должны быть однородными.

Величина  $\tilde{\delta i \zeta}$  определяется на основе анализа водохозяйственной обстановки в бассейне. В зависимости от конкретных условий в качестве  $\tilde{\delta i \zeta}$  могут быть приняты площади орошаемых земель, объемы водозаборов и т. д.

Порядок проведения расчетов по оценке антропогенного изменения стока при использовании зависимости (4.9) следующий:

- 1) выбор максимально возможного числа бассейнов – индикаторов из условия наибольшей длительности совместных наблюдений за стоком в замыкающем створе и бассейнах – индикаторах; длительность совместных наблюдений за естественный период на реках – индикаторах и на изучаемой реке должна быть не менее 20 лет при двух реках – индикаторах и не менее 30 лет при трех;
- 2) проверка гидрологического режима бассейнов-индикаторов на стационарность и неискаженность режима за весь период наблюдений;
- 3) определение года нарушения гидрологического режима под влиянием антропогенных факторов в замыкающем створе;
- 4) составление уравнений регрессии за естественный период;

5) анализ устойчивости решений по оценке антропогенного изменения стока в зависимости от объема исходной информации;

6) выбор оптимальной оценки антропогенного изменений стока из ансамбля (вариантов) оценок;

7) выбор оптимальной оценки с оценками, полученными другими методами, и выбор окончательной оценки.

В случае расчетов только по донному варианту исследования по пунктам 5 и 6 не производятся.

Определение зависимостей (4.8) – (4.10) и расчеты выполняются в соответствии с рекомендациями, изложенными выше.

Зависимость вида (4.10) используется для восстановления и оценки антропогенных изменений стока за весь период наблюдений. Расчеты выполняются в следующей последовательности.

За период наблюдений определяется регрессионная зависимость стока в рассматриваемом створе от основных естественных и антропогенных факторов вида

$$Q = a_1 \sum Q_{i\delta} + a_2 D + a_3 t + a_4 V_{\delta i \zeta} + a_0, \quad (4.11)$$

где  $a_1, \dots, a_4$  - коэффициенты регрессии,  $a_0$  - свободный член.

Восстанавливается сток, соответствующий уровню хозяйственного освоения водосбора на начало инструментальных наблюдений, по уравнению

$$Q_{\text{âîññò}} = a_1 \sum Q_{i\delta} + a_2 P + a_3 t + a_4 V_{\delta i \zeta . i} + a_0 \quad (4.12)$$

где  $V_{\delta i \zeta . i}$  - значение комплексного антропогенного фактора (площадь орошаемых земель, площадь осушенных земель, суммарного водозабора и др.) на начало рассматриваемого периода.

По разности между измеренным и восстановленным стоком определяется его изменение под влиянием хозяйственной деятельности.

*Пример.* Восстановить сток р. Аракса у с. Кюбектала за вегетационный период (IV – X) и дать оценку его изменений под влиянием комплекса факторов хозяйственной деятельности с 1955 по 1980 г.

Площадь водосбора р. Аракса составляет 101900 км<sup>2</sup>. В пределах Российской Федерации находится только 35% площади водосбора, хотя здесь формируется большая часть водных ресурсов реки. В настоящее время в бассейне р. Аракса на территории России орошаемые площади составляют 500 тыс. га. В р. Аракс с 1936 г. осуществляются сбросы из оз. Севан, а с 1959 г. из Верхнекарабахского канала (ВКК).

Предварительно сток р. Аракса у с. Кюбектала был восстановлен с учетом данных гидрометрических измерений за сбросами из оз. Севан и по ВКК.

За период 1927 – 1954 гг. было получено уравнение, выражающее регрессионную зависимость вегетационного стока в створе с. Кюбектала от естественных факторов в виде

$$Q = 1,08 \sum Q_{\text{ю}} + 0,06D - 112, \quad (4.13)$$

$$R = 0,91,$$

где  $\sum Q_{\text{ю}}$  - суммарный приток из зоны формирования за вегетационный период, рассчитанный по данным измерений на 27 горных реках;  $P$  – осадки за вегетационный период в зоне использования стока, определенные по данным трех метеостанций.

По уравнению (4.13) был восстановлен вегетационный сток р. Аракча у с. Кюбектала за 1955 0 1980 гг., и по разнице наблюдений и рассчитанного стока определено его изменение под влиянием хозяйственной деятельности в бассейне.

В соответствии с выполненными расчетами средний за 1955-1980 гг. восстановленный сток составил 6,2 км<sup>3</sup>, а его уменьшение 1,2 км<sup>3</sup>.

Случайная ошибка определения изменения вегетационного стока для периода 1955-1980 гг. составляет  $\pm 0,14$  км<sup>3</sup>.

*Пример.* Дать оценку изменения годового стока р. Аракса у с.Кюбектала за 1955-1980гг.

На рис.4 приведен график связи между суммарным притоком из зоны формирования, определенным по данным наблюдений на 27 горных реках, и стоком р. Аракса у с. Кюбектала, рассчитанным с учетом попусков из оз. Севан и по ВКК, построенный по данным за 1927 – 1980 гг. :На графике выделены зависимости отдельно за периоды 1927 – 1954 гг. и 1955 – 1980 гг. При одном и том же притоке из зоны формирования годовой сток в рассматриваемом створе за период 1955 – 1980 гг. снизился на 1,6 км<sup>3</sup>/год по сравнению с предшествующим периодом.

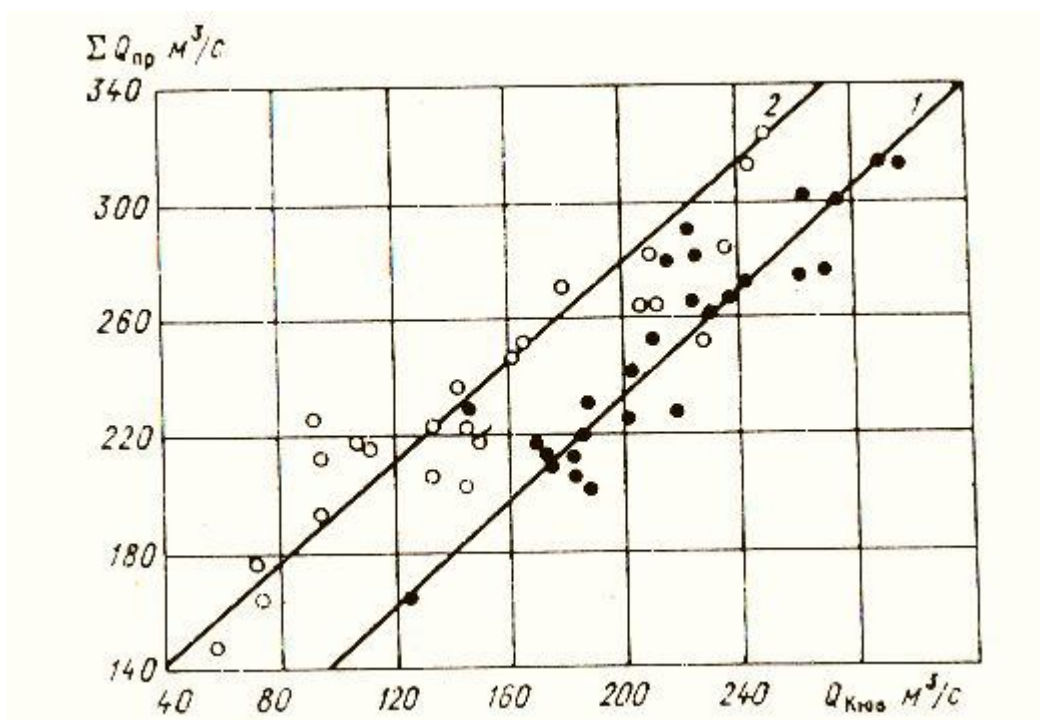


Рис.4. Зависимость годового стока р. Аракса у с. Кюбектала от суммарного притока из зоны формирования.

1) 1927-1954гг., 2) 1955 – 1980 гг.

## 5. МЕТОД ОЦЕНКИ АНТРОПОГЕННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ СТОКА ПО МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИМ ФАКТОРАМ

Метод используется для восстановления и оценки изменений годового и весеннего стока средних равнинных рек, водные ресурсы которых формируются и используются на всей территории бассейна.

Восстановление и оценка изменений стока весеннего половодья рек Европейской части России выполняется с использованием многофакторных зависимостей, приведенных в табл. 5.1.

Для водосбора лесостепной и степной зон европейской части России и Северного Казахстана может быть использована зависимость

$$Q_{\text{ааӈ}} = f(S + P_{\text{ааӈ}}, P_{\text{X-XI}}, d, t_{\text{ааӈ}}), \quad (5.1)$$

где  $S$  – запасы воды в снежном покрове к началу снеготаяния;  $P_{\text{ааӈ}}$  – осадки за период весеннего половодья;  $P_{\text{X-XI}}$  – осадки за октябрь – ноябрь предшествующего года;  $d$  – дефицит влажности воздуха за июнь – сентябрь предшествующего года;  $t_{\text{ааӈ}}$  – средняя температура воздуха за период снеготаяния.

В зависимостях (5.1) и приведенных в табл. 5.1 порядок записи переменных соответствует доле вклада, которую они вносят в уравнение регрессии.

Определение характеристик, необходимых для установления зависимостей стока от метеорологических факторов, производится в соответствии с рекомендациями [4].

Восстановление и оценка изменений годового стока рек зоны избыточного увлажнения выполняется по его зависимости от годовых осадков и средней годовой температуры.

Для зоны недостаточного увлажнения восстановление годового стока производится по зависимости

$$Q_{\text{ааа}} = f(Q_{\text{ааа}}), \quad (5.2)$$

где  $Q_{\text{ааа}}$  - объем весеннего половодья, восстановленный по одной из зависимостей, приведенных выше.

Определение зависимостей (5,1-5,2), а также приведенных в табл. 5.1 и расчеты выполняются в соответствии с рекомендациями, изложенными выше.

Таблица 5.1

Вид зависимости весеннего половодья от определяющих его климатических факторов рек европейской части России для условий естественного режима

Номер района	Вид зависимости	Географическое положение района, реки
I	$Q = f(S + P_{\text{ааа}})$	Север европейской части, Северная Двина, Онега, Печора
II	$Q = f[(S + P_{\text{ааа}}), U]$	Северо-запад европейской части, Западная Двина, Шексна, Вятка, Кама
III	$Q = f[(S + P_{\text{ааа}}), U, L]$	Центр европейской части, Москва, Ока, Верховье Днепра
IV	$Q = f[(S + P_{\text{ааа}}), L, U]$	Центр европейской части, Дон, Днепр, Южный Буг
V	$Q = f[(S + P_{\text{ааа}}), U, L]$	Заволжье и правобережье Волги, Сура, Медведица
VI	$Q = f[(S + P_{\text{ааа}}), \overline{U}, \overline{L}]$	Юг Украины, Прикаспийская низменность, низовья Дона и Волги

Примечание.  $Q$  – объем весеннего стока;  $S$  – запас воды в снежном покрове к началу весны;  $P_{\text{аан}}$  – осадки за период весеннего половодья;  $U$  – увлажнение почв водосбора;  $L$  – глубина промерзания почв водосбора. Черта над  $U$  и  $L$  указывает на одинаковую значимость этих факторов в формировании весеннего стока.

## 6. МЕТОД ГИДРОЛОГИЧЕСКОЙ АНАЛОГИИ

Восстановление и оценка изменений стока под влиянием хозяйственной деятельности методом гидрологической аналогии выполняется на основе анализа зависимостей:

$$Q = f(Q_a); \quad (6.1)$$

$$Q = f(Q_{a_1}, Q_{a_2}, \dots, Q_{a_n}), \quad (6.2)$$

где  $Q$  – годовой (сезонный) сток реки;  $Q_{a_i}$  – годовой (сезонный) сток рек-аналогов

Определение зависимостей (6.1) – (6.2) и расчеты выполняются в соответствии с рекомендациями, изложенными выше.

При выборе рек-аналогов необходимо учитывать следующие условия:  
- наличие совместных наблюдений за стоком за многолетние периоды с существенно различным уровнем хозяйственного освоения рассматриваемого водосбора;

- возможную географическую близость расположения водосборов;

- сходство климатических условий;

- однородность условий формирования стока, однотипность почв (грунтов) и гидрогеологических условий, по возможности близкую степень озерности и заболоченности;

- площади водосборов должны различаться не более чем в 10 раз, а их средние высоты не более чем на 300 м;

- сток рек-аналогов должен быть естественным за весь период наблюдений.

*Пример.* Восстановить сток весеннего половодья р. Урала у г. Оренбурга за период с 1955 по 1980 г. и дать оценку его изменения под влиянием комплекса факторов хозяйственной деятельности.

В бассейне р. Урала выше г. Оренбурга в 1955 г. введено Ириклинское водохранилище, а с 1964 г. – Верхнеуральское, осуществляющее многолетнее регулирование стока. В последние три десятилетия получили также развитие такие виды хозяйственной деятельности, как промышленно-коммунальное водопотребление и орошение.

В качестве реки-аналога выбрана р. Сакмара, сток которой является условно-естественным за весь период наблюдений.

За период с 1936 по 1954 г. было получено уравнение, выражающее регрессионную зависимость весеннего стока р. Урала у г. Оренбурга от стока реки-аналога [11]:

$$Q_{\text{О}} = 0,45Q_{\text{С}} - 15,2; \quad (6.3)$$

$$R=0,94,$$

где  $Q_{\text{Н}}$  - сток весеннего половодья р. Сакмары у с. Сакмарского.

По уравнению (6.3) был восстановлен сток весеннего половодья р. Урала у г. Оренбурга за 1955 – 1980 гг., и по разнице наблюдаемого и рассчитанного стока определено его изменение под влиянием хозяйственной деятельности в бассейне.

В соответствии с выполненными расчетами средний за 1955 – 1980 гг. восстановленный сток составил  $2,9 \text{ км}^3$ , а его снижение  $0,9 \text{ км}^3$ .

Случайная ошибка определения изменения весеннего стока составила для периода 1955 – 1980 гг.  $\pm 0,20 \text{ км}^3$ .



## 7. МЕТОД ЛИНЕЙНОГО ТРЕНДА

Метод линейного тренда рекомендуется применять для оценки изменения годового, сезонного и месячного стока рек, в бассейнах которых можно выделить зону формирования и зону использования стока.

Уравнение линейного тренда стока имеет вид

$$Q_t = \bar{Q} + \alpha(t - \bar{t}), \quad (7.1)$$

где  $Q_t$  - расчетный сток в момент времени  $t$ ,  $\bar{Q}$  - средний сток за период наблюдений;  $\alpha$  - угловой коэффициент, отражающий наклон линии тренда;  $\bar{t}$  - порядковый номер срединного члена стокового ряда, для первого члена ряда  $t = 1$ .

Параметры линейного тренда оцениваются методом наименьших квадратов. Коэффициент  $\alpha$  определяется по формуле

$$\alpha = \frac{\sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})(Q_{\text{эци } i} - \bar{Q})}{\sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})^2}. \quad (7.2)$$

Ошибка коэффициента  $\alpha$  рассчитывается по формуле

$$\sigma_\alpha = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{\text{эци } i} - \bar{Q})^2}{(n - 2) \sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})^2}, \quad (7.3)$$

где  $n$  - общее число членов ряда.

При отсутствии направленных изменений в многолетних колебаниях притока из зоны формирования естественный (восстановленный) сток с использованием метода тренда рассчитывается по уравнению

$$Q_{\text{анò}} = Q_{i,\text{ò}} + (Q_{\text{эци}} - Q_t), \quad (7.4)$$

где  $Q_{\text{âñò}}$  - естественный, восстановленный сток;  $Q_{i,\delta}$  - расчетное, начальное значение стока по уравнению (7.4);  $Q_{\text{èçì}}$ ,  $Q_t$  - измеренный (бытовой) и расчетный сток в момент времени  $t$ .

*Пример.* Восстановить естественный сток и дать оценку антропогенного изменения годового стока р. Терек – ст-ца Каргалинская за 1930-1976 гг.

## 8. ВОДНОБАЛАНСОВЫЕ МЕТОДЫ УЧЕТА ВЛИЯНИЯ АНТРОПОГЕННЫХ ФАКТОРОВ НА РЕЧНОЙ СТОК

Для восстановления годового и сезонного стока используется следующее уравнение:

$$Q_{\text{âñò}} = Q_{\text{èçì}} + \Delta Q_{\text{âñà}} + \Delta Q_{\text{ìð}} + \Delta Q_{\text{îáð}} + \Delta Q_{\text{ìð-è}} + \Delta Q_{\text{ñ/ò}} + \Delta Q_{\text{á}} + \Delta Q_{\text{ë}} + \Delta Q_{\text{âáð}} \quad (8.1)$$

где  $Q_{\text{âñò}}$  - восстановленный сток;  $Q_{\text{èçì}}$  - сток, измеренный в замыкающем створе;  $\Delta Q_{\text{âñà}}$ ,  $\Delta Q_{\text{ìð}}$ ,  $\Delta Q_{\text{îáð}}$ ,  $\Delta Q_{\text{ìð-è}}$ ,  $\Delta Q_{\text{ñ/ò}}$ ,  $\Delta Q_{\text{á}}$ ,  $\Delta Q_{\text{ë}}$ ,  $\Delta Q_{\text{âáð}}$  - изменение стока под влиянием водохранилищ, орошения, перебросок, промышленно-коммунального и сельскохозяйственного водопотребления, осушения болот и заболоченных земель, вырубок леса и лесовосстановления, агролесомелиоративных мероприятий.

Оценка изменения стока под влиянием хозяйственной деятельности выполняется по уравнению

$$\Delta Q_{\text{ðíç}} = Q_{\text{èçì}} - Q_{\text{âñò}} \quad (8.2)$$

Для участка реки (или зоны использования) определяется изменение стока под влиянием антропогенных факторов для части водосбора, заключенной между верхним и нижним створом (или зоной формирования и нижним створом).

Изменение стока под влиянием факторов хозяйственной деятельности, относящихся к первой группе (промышленно-коммунальное и сельскохозяйственное водопотребление, переброска стока), которые практически не влияют на условия формирования стока, определяется по данным о заборах и сбросах воды, полученным органами Минводхоза СССР в рамках единой общегосударственной системы учета вод и из использования в народном хозяйстве. При отсутствии таких данных используются приближенные способы их учета.

Использование данных только по водозаборам и водосбросам является недостаточным для надежного восстановления и оценки антропогенных изменений стока в следующих речных бассейнах:

- бассейнах, в которых значительным является эффект повторного использования вод по длине реки;
- бассейнах, расположенных в зоне недостаточного увлажнения со значительными потерями на непродуктивное испарение в пойме и дельте;
- бассейнах, где значительное развитие получили факторы хозяйственной деятельности, изменяющие условия формирования стока, а также связанные с преобразованием русловой сети.

Для таких бассейнов наряду с методами, использующими данные по непосредственным изъятиям воды на хозяйственные нужды и сбросам использованных вод в реки, используются методы, основанные на учете изменения элементов водного баланса водосборов под влиянием различных видов хозяйственной деятельности.

Оценка изменения стока под влиянием отдельных видов хозяйственной деятельности заключается в оценке изменений воды в бассейне ( $\Delta S$ ) и суммарного испарения с его поверхности ( $\Delta E$ ).

$$\Delta Q_{\delta i \zeta} = \Delta S + \Delta E . \quad (4.3)$$

Изменение испарения в бассейне в результате влияния антропогенных факторов является постоянно действующим фактором, влияющим на

водный режим реки и ее водные ресурсы. Изменение запасов воды в бассейне в результате заполнения водохранилищ, расходовании воды на насыщение почвогрунтов орошаемых участков и др. происходит в течение определенного периода времени.

Основной методический подход при оценке значений  $\Delta S$  и  $\Delta E$  заключается в составлении и сравнительном анализе уравнения водного баланса водосбора (или участка водосбора) для естественных и нарушенных тем или иным видом хозяйственной деятельности условий.

Для прогноза годового и сезонного стока рек, соответствующих определенному уровню хозяйственного освоения водосбора, используется уравнение

$$Q_{i\delta} = Q_{\text{анн}\delta} + \Delta Q_{\text{аиа}} + \Delta Q_{i\delta} + \Delta Q_{i\text{ад}} + \Delta Q_{i\delta-\epsilon} + \Delta Q_{\text{н/о}} + \Delta Q_{\text{а}} + \Delta Q_{\epsilon} + \Delta Q_{\text{аад}}, \quad (8.4)$$

где  $Q_{i\delta}$  - прогнозируемый сток;  $Q_{\text{анн}\delta}$  - естественный сток в замыкающем створе;  $\Delta Q_{\text{аиа}}$ ,  $\Delta Q_{i\delta}$ ,  $\Delta Q_{i\text{ад}}$ ,  $\Delta Q_{i\delta-\epsilon}$ ,  $\Delta Q_{\text{н/о}}$ ,  $\Delta Q_{\text{а}}$ ,  $\Delta Q_{\epsilon}$ ,  $\Delta Q_{\text{аад}}$  - прогнозные значения изменения стока под влиянием отдельных факторов хозяйственной деятельности при заданном уровне их развития.

Оценка возможных в перспективе изменений стока под влиянием хозяйственной деятельности выполняется по уравнению

$$\Delta Q_{\delta i \zeta} = Q_{i\delta} - Q_{\text{анн}\delta}. \quad (8.5)$$

Прогноз изменения стока под влиянием промышленно-коммунального и сельскохозяйственного водопотребления выполняется по данным о планируемых водозаборах и сбросах воды в этих отраслях народного хозяйства или по нормативам водопотребления и водоотведения.

Прогноз изменения водности рек под влиянием факторов хозяйственной деятельности, изменяющих условия формирования стока, заключается в оценке возможных в перспективе изменений составляющих водного баланса водосборов в результате осуществления планируемых водохозяйственных мероприятий.

Перспективная оценка изменения стока под влиянием хозяйственной деятельности может быть выполнена для лет различной водности.

При расчетах для средних условий в качестве исходной информации принимаются средние многолетние значения гидрометеорологических элементов. Значение  $Q_{\text{анн}}$  в формуле (8.4) принимается равным норме стока за естественный (условно-естественный) период или за весь период наблюдений с учетом его восстановленных значений.

Для расчета изменений стока рек в маловодные и многоводные годы предварительно производится их определение по данным наблюдений за исходной гидрометеорологической информацией за период не менее 10 – 15 лет. Затем строится эмпирическая кривая обеспеченности и определяются потери стока под влиянием того или иного фактора хозяйственной деятельности различной обеспеченности.

При расчете по формуле (8.4) значения  $Q_{\text{анн}}$  заданной обеспеченности определяются в соответствии с указаниями, изложенными в работе [13], по данным наблюдений за естественный (условно-естественный) период или за весь период наблюдений с учетом восстановленных значений стока.

Ориентировочно может быть принято, что в исключительно маловодные ( $P = 95\%$ ) и многоводные ( $P = 5\%$ ) годы снижение стока под влиянием отдельных видов хозяйственной деятельности могут быть приняты с обеспеченностью 5 и 95%.

Соответствующие обеспеченности значений стока и его потерь на различные хозяйственные нужды можно определить также путем совместного анализа многолетних колебаний стока и основных естественных факторов, определяющих изменчивость безвозвратных потерь стока под влиянием различных видов хозяйственной деятельности.

Исходными для воднобалансовых расчетов по восстановлению и оценке антропогенных изменений стока являются материалы наблюдений

за гидрометеорологической информацией опорной сети Госкомгидромета с привлечением в необходимых случаях данных специальных наблюдений других министерств и ведомств, данных по использованию речных вод в народном хозяйстве, проектных данных по водозаборам и сбросам воды в отраслях народного хозяйства, современным и перспективным площадям мелиорируемых земель, параметрам современных и перспективных оросительных и осушительных систем, структуре посевных площадей и др.

Надежность расчетов по восстановлению речного стока и оценке его антропогенных изменений воднобалансовым методом определяется точностью исходных данных. Точность расчета оценивается средним квадратическим значением совокупной погрешности расчета составляющих уравнений (8.1) и (482), вычисляемым по уравнениям:

$$\begin{aligned} \sigma_{Q_{\hat{a}\hat{i}\hat{n}\hat{n}\hat{o}}} &= \sqrt{\sigma_{Q_{\hat{e}\hat{c}\hat{i}}}^2 + \sigma_{\Delta Q_{\hat{a}\hat{i}\hat{a}}}^2 + \sigma_{\Delta Q_{\hat{i}\hat{o}}}^2 + \sigma_{\Delta Q_{\hat{i}\hat{a}\hat{o}}}^2 + \sigma_{\Delta Q_{\hat{i}\hat{o}-\hat{e}}}^2 + \sigma_{\Delta Q_{\hat{n}/\hat{o}}}^2 + \sigma_{\Delta Q_{\hat{a}}}^2 + \sigma_{\Delta Q_{\hat{e}}}^2 + \sigma_{\Delta Q_{\hat{a}\hat{a}\hat{o}}}^2} = \\ &= \sqrt{(\delta_{\hat{e}\hat{c}\hat{i}} Q_{\hat{e}\hat{c}\hat{i}})^2 + (\delta_{\Delta Q_{\hat{a}\hat{i}\hat{a}}} \Delta Q_{\hat{a}\hat{i}\hat{a}})^2 + (\delta_{\Delta Q_{\hat{i}\hat{o}}} \Delta Q_{\hat{i}\hat{o}})^2 + (\delta_{\Delta Q_{\hat{i}\hat{a}\hat{o}}} \Delta Q_{\hat{i}\hat{a}\hat{o}})^2 + (\delta_{\Delta Q_{\hat{n}/\hat{o}}} \Delta Q_{\hat{n}/\hat{o}})^2}; \end{aligned} \quad (8.6)$$

$$\sigma_{\Delta Q_{\hat{o}\hat{i}\hat{c}}} = \sqrt{\sigma_{Q_{\hat{e}\hat{c}\hat{i}}}^2 + \sigma_{Q_{\hat{a}\hat{i}\hat{n}\hat{n}\hat{o}}}^2} = \sqrt{(\delta_{\hat{e}\hat{c}\hat{i}} Q_{\hat{e}\hat{c}\hat{i}})^2 + (\delta_{\hat{a}\hat{i}\hat{n}\hat{n}\hat{o}} Q_{\hat{a}\hat{i}\hat{n}\hat{n}\hat{o}})^2}, \quad (8.7)$$

где  $\sigma_{Q_{\hat{e}\hat{c}\hat{i}}}$ ,  $\sigma_{\Delta Q_{\hat{a}\hat{i}\hat{a}}}$ ,  $\sigma_{\Delta Q_{\hat{i}\hat{o}}}$ ,  $\sigma_{\Delta Q_{\hat{i}\hat{a}\hat{o}}}$ ,  $\sigma_{\Delta Q_{\hat{i}\hat{o}-\hat{e}}}$ ,  $\sigma_{\Delta Q_{\hat{n}/\hat{o}}}$ ,  $\sigma_{\Delta Q_{\hat{a}}}$ ,  $\sigma_{\Delta Q_{\hat{e}}}$ ,  $\sigma_{\Delta Q_{\hat{a}\hat{a}\hat{o}}}$  - средние квадратические погрешности определения соответствующих составляющих уравнений (8.) и (8.);  $\delta_{\hat{e}\hat{c}\hat{i}}$ ,  $\delta_{\Delta Q_{\hat{a}\hat{i}\hat{a}}}$ ,  $\delta_{\Delta Q_{\hat{i}\hat{o}}}$ ,  $\delta_{\Delta Q_{\hat{i}\hat{a}\hat{o}}}$ ,  $\delta_{\Delta Q_{\hat{n}/\hat{o}}}$ ,  $\delta_{\Delta Q_{\hat{i}\hat{o}-\hat{e}}}$ ,  $\delta_{\Delta Q_{\hat{a}}}$ ,  $\delta_{\Delta Q_{\hat{e}}}$ ,  $\delta_{\Delta Q_{\hat{a}\hat{a}\hat{o}}}$  - относительные средние квадратические погрешности определения составляющих уравнений (8.1) и (8.2).

Результаты оценки изменений стока  $\Delta Q_{\hat{o}\hat{i}\hat{c}}$  можно считать надежными, если их абсолютное значение существенно отличается от погрешности определения:

$$|\Delta Q_{\hat{o}\hat{i}\hat{c}}| \geq \alpha_P \sigma_{\Delta Q_{\hat{o}\hat{i}\hat{c}}}, \quad (8.8)$$

где  $\alpha_D$  - доверительный интервал погрешности расчета в долях ее среднего квадратического значения.

Величина  $\alpha_D$  зависит от доверительной вероятности  $P$ . При оценке надежности расчета  $\Delta Q_{\delta i \zeta}$   $P$  принимается равным 0,95, для которого  $\alpha_D = 2$ .

## 9. ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ВОДОХРАНИЛИЩ НА РЕЧНОЙ СТОК

### 9.1 Детальная схема расчета

Детальная схема расчета применяется для оценки влияния водохранилищ на годовой и сезонный сток рек. Изменения водных ресурсов происходят в основном при сооружении речных водохранилищ, когда дополнительному затоплению подвергаются большие массивы прилегающих земель. Для озерных водохранилищ, создаваемых вследствие подпора озер, изменения водных ресурсов незначительны, и ими, как правило, можно пренебречь.

В результате сооружения водохранилищ происходит изменение объема стока в замыкающем створе реки  $\Delta Q$  за счет изменения испарения в бассейне  $\Delta E$ , а также за счет заполнения чаши водохранилища и увеличения запасов подземных вод  $\Delta S$ :

$$\Delta Q = \Delta E + \Delta S. \quad (9.1)$$

Первая составляющая уравнения (9.1) характеризует изменения испарения в бассейне, включая изменение испарения с затопленных территорий  $E_{\zeta}$ , с подтопленных территорий  $E_I$ , с территорий в нижних бьефах водохранилищ, ранее затапливаемых в периоды высокой водности  $E_{i.d}$ :

$$\Delta E = E_C + \dot{A}_i + \dot{A}_{i.\dot{a}}. \quad (9.2)$$

Величина  $\Delta S$  оценивается только для периода с момента заполнения водохранилища до наступления установившегося режима подземных вод (если отсутствует постоянный отток воды из водохранилища за пределы водосбора).

Слой потерь на испарение с зоны затопления  $E'_C$  определяется по формуле

$$\dot{A}'_C = \dot{A}'_A - \dot{D} + Q'_C, \quad (9.3)$$

где  $E'_C$  - испарение с водной поверхности, мм;  $\dot{D}$  - осадки на водную поверхность, мм;  $Q'_C$  - сток с затопленной территории, мм.

Слои испарения и осадков принимаются по материалам текущих водных балансов водохранилищ, составляемых УГКС для крупных водохранилищ.

При отсутствии данных по водным балансам расчет испарения с водной поверхности производится для безледоставного периода в соответствии с Указаниями [12].

Слой осадков на поверхность водохранилища  $P'$  определяется по данным ближайших к району расположения водохранилища метеостанций с введением поправок на недоучет осадков за счет выдувания, испарения из осадкомерного ведра и его смачивания в соответствии с методикой, изложенной в пособии [5].

Для расчет годовых значений слоя естественного стока при наличии материалов по водным балансам для равнинных водохранилищ используется зависимость [1]

$$Q'_C = (Q_{\dot{a}.\dot{i}\dot{\delta}} / F_{\dot{a}.\dot{i}\dot{\delta}}) \cdot 10^{-6}, \quad (9.4)$$



где  $Q_{á.ið}$  - объем бокового притока к водохранилищу, км<sup>3</sup> (принимаются притоки с площадями водосбора не более 2000 км<sup>3</sup>);  $F_{á.ið}$  - площадь, на которой формируется боковой приток, определяется по разности площади бассейна водохранилища и площади водосбора реки до входного створа, км<sup>2</sup>.

При отсутствии данных по водным балансам водохранилищ слой стока  $Q_{\zeta}'$  может быть определен по данным гидрометрических наблюдений в пределах рассматриваемой территории до ее затопления.

Наиболее надежно  $Q_{\zeta}'$  рассчитывается методом аналогии. В качестве аналогов принимаются водосборы, расположенные в районе водохранилища и имеющие климатические и физико-географические характеристики, близкие соответствующим характеристикам затопленной территории. Для каждого крупного водохранилища используется несколько аналогов и величина  $Q_{\zeta}'$  рассчитывается как среднее из наблюдаемых значений стока по всем принятым аналогам.

Объем потерь на испарение с зоны затопления определяется как произведение слоя потерь с зон затопления на площадь затопления  $F_{\zeta}$ :

$$\dot{A}_{\zeta} = 10^{-6} / \dot{A}_{\zeta}'' F_{\zeta}. \quad (9.5)$$

Площадь затопления ( $F_{\zeta}$ , км<sup>2</sup>) определяется по разности площадей водного зеркала водохранилища  $F_{\hat{A}}$  и русла реки в естественных условиях  $F_{\delta}$ :

$$F_{\zeta} = F_{\hat{A}} - F_{\delta}. \quad (9.6)$$

Площадь русла в естественных условиях  $F_{\delta}$  является функцией основного притока в водохранилищу  $Q_{i\delta}$  и определяется по зависимости вида

$$F_p = f(Q_{i\delta}). \quad (9.7)$$

При построении графика для периодов высокой водности величины  $F_{\delta}$  могут быть определены по кривым площадей водохранилища, а в периоды низкой водности – по картам, по материалам гидрометрических работ или проектным данным.

Потери на испарение с зоны подтопления прилегающих к водохранилищу земель ( $E_I$ , км<sup>3</sup>) определяется по формуле

$$\dot{A}_I = 10^{-6}(\dot{A}'_I - \dot{A}'_N)F_I, \quad (9.8)$$

где  $\dot{A}'_I$  - испарение с зоны подтопления, мм;  $\dot{A}'_N$  - испарение с площади суши до подтопления, мм;  $F_I$  - площадь подтопленной территории, км<sup>2</sup>. Величина  $\dot{A}'_I$  определяется по данным специальных наблюдений или для районов недостаточного увлажнения принимается равной  $\frac{2}{3}$  испарения с водной поверхности, а для районов достаточного и избыточного увлажнения равной испарению с водной поверхности.

Приемы оценки  $\dot{A}'_N$  изложены в Рекомендациях [8]. Площадь подтопленной территории  $F_I$  - участок суши, прилегающий к контуру водохранилища с глубиной залегания грунтовых вод не более 2 – 2,5 м – определяется по проектным данным или по материалам специальных обследований. Для равнинных водохранилищ размеры зон подтопления, как правило, не превышают 5-7% площади водной поверхности водохранилища.

Уменьшение испарения в нижних бьефах водохранилищ  $E_{i.\dot{a}}$  вследствие сокращения площадей затопления поймы или дельты в условиях регулирования речного стока определяется по выражению

$$E_{i.\dot{a}} = 10^{-6}(\dot{A}'_{\tilde{N}} - \dot{A}'_A)(F_{i.\dot{a}} - F_p), \quad (9.9)$$

где,  $\dot{A}'_{\tilde{N}}$  - испарение с участков поймы или дельты, затапливаемых до создания водохранилища, мм;  $F_{i.\dot{a}}$  - площадь водной поверхности реки ниже данного водохранилища до следующего водохранилища каскада или до первого крупного притока, км<sup>2</sup>,  $F_\delta$  - площадь водной поверхности реки в естественных условиях на том же участке при том же расходе воды во входном створе водохранилища, км<sup>2</sup>.

Приемы определения  $\dot{A}'_{\tilde{N}}$  и  $E'_B$  изложены в соответствующих изданиях [8,12]. При определении площадей  $F_{i.\dot{a}}$  используются рекомендации, изложенные в Указаниях [6]. Площади русла рек в естественных условиях рекомендуется определять по картам.

Объем временных изменений водных ресурсов ( $\Delta S$ ) складывается из объемов воды, расходуемых на аккумуляцию в чаше водохранилища ( $S_{\dot{a}\dot{e}}$ ) и пополнение запасов подземных вод ( $S_{i.\dot{a}}$ ):

$$\Delta S = S_{\dot{a}\dot{e}} + S_{i.\dot{a}}; \quad (9.10)$$

$$S_{i.\dot{a}} = S_{\dot{e}} + S_{\dot{a}}. \quad (9.11)$$

Величина  $S_{\dot{a}\dot{e}}$  (км<sup>3</sup>) принимается под данным водных балансов водохранилищ. В случае отсутствия данных под водным балансам величину  $S_{\dot{a}\dot{e}}$  можно приближенно рассчитать по зависимости:

$$S_{\dot{a}\dot{e}} = k_i S_{i\dot{a}\dot{u}}, \quad (9.12)$$

где  $k_i$  - коэффициент, показывающий степень наполнения водохранилища за рассматриваемый период (если уровень равнее НПУ, то  $k_i = 1$ ; для водохранилищ суточного и недельного регулирования  $k_i = 1$ ; для водохранилищ сезонного регулирования  $k_i = 0,7...0,9$ ; для водохранилищ многолетнего регулирования  $k_i = 0,5...0,7$ );  $S_{i\dot{a}\dot{a}}$  - полный объем водохранилища, км<sup>3</sup>.

Величина  $S_{i,\dot{a}}$  складывается из затрат воды на насыщение зоны аэрации ложа водохранилища  $S_{\dot{e}}$  и объемов воды, поступающей в берега  $S_{\dot{a}}$ .

Величина  $S_{\dot{e}}$  (км<sup>3</sup>) определяется по формуле

$$S_{\dot{e}} = H_{\dot{e}} \mu_{\dot{e}} F_{\dot{a}} \cdot 10^{-3}, \quad (9.13)$$

где  $H_{\dot{e}}$  - средняя мощность зоны аэрации ложа водохранилища до его сооружения, м (определяется по региональным гидрогеологическим картам или по данным гидрогеологических ежегодников);  $\mu_{\dot{e}}$  - коэффициент водоотдачи или недостаток насыщения почвогрунтов (принимается в зависимости от характеристики почвогрунтов зоны аэрации).

Объем воды, поступающей в берега  $S_{\dot{a}}$ , оценивается при наличии детальных гидрогеологических данных в соответствии с Рекомендациями [7]. Для крупных равнинных водохранилищ величину  $S_{\dot{a}}$  ориентировочно можно определять по формуле

$$S_{\dot{a}} = 0,5kS_{i\dot{a}\dot{a}} \mu_{\dot{a}} H_{\dot{a}}^{0,6}, \quad (9.14)$$

где  $H_a$  - средняя глубина залегания уровня грунтовых вод на территориях, прилегающих к водохранилищу до его сооружения, м;  $\mu_a$  - коэффициент водоотдачи (недостаток насыщения) почвогрунтов на прилегающих территориях;  $S_{iai}$  - полный объем водохранилища, км<sup>3</sup>;  $k_i$  - коэффициент наполнения водохранилища в выражении (9.12).

В расчетах можно принять, что поступление воды в берега для больших равнинных водохранилищ происходит в течение 8 – 10 лет после их наполнения, при этом в первый год поступает 30%, во второй 20%, в последующие – 15, 10, 8, 6, 5, 4 и 2% суммарного объема  $S_a$ .

*Пример.* Рассчитать изменение годового стока на 1975 г. р. Волги в результате сооружения Куйбышевского водохранилища.

#### 1. Основные сведения о Куйбышевском водохранилище:

Период создания водохранилища	Объем, км <sup>3</sup>		Площадь зеркала, км <sup>2</sup>	Длина, км	Средняя глубина, м
	полный	полезный			
1955 - 1957	58,0	34,6	6450	510 по Волге 280 по Каме	9,0

2. Потери на испарение в миллиметрах слоя с затопленных водохранилищем территорий рассчитывались по формуле (9.3).

По данным годового водного баланса, количество осадков на водную поверхность Куйбышевского водохранилища 384 мм; испарение с водной поверхности 739мм; слой стока с затопленной территории 83 мм.

Объем потерь на испарение рассчитывается по выражению 9.5).

Площадь затопления определялась по разности площадей водного зеркала водохранилища и русла реки в естественных условиях.

Площадь зеркала водохранилища в 1975 г. 4780 км<sup>2</sup>.

Площадь русла реки определялась по графику зависимости  $F_p = f(Q_{i0})$ . Величина  $Q_{i0}$  4944 м<sup>3</sup>/с. Площадь русла 1304 км<sup>2</sup>.

Площадь затопления 3476 км<sup>2</sup>.

Объем дополнительных потерь с зоны затопления 1,62 км<sup>3</sup>.

3. Потери на испарение в миллиметрах слоя с подтопленных земель рассчитывались по формуле (9.8).

Так как Куйбышевское водохранилище находится в зоне недостаточного увлажнения, испарение с подтопленных земель можно принять равным 2/3 испарения с водной поверхности, т.е. 576 мм.

Испарение с суши рассчитывалось комплексным методом ГГО и составило 400 мм/год.

Объем потерь с подтопленных земель в данном году 0,05 км<sup>3</sup>/год.

4. Величина  $E_{i.a}$  не определялась, поскольку ниже Куйбышевского водохранилища расположено Волгоградское водохранилище и пойма отсутствует.

5. Затраты воды на насыщение ложа водохранилища имели место лишь в годы наполнения водохранилища, а фильтрация в берега происходила с 1955 по 1964 г., поэтому в данном году расчеты  $S_{\bar{e}}$  и  $S_{\bar{a}}$  не производились.

В данном году сработка из водохранилища составила 12,51 км<sup>3</sup>.

6. В результате изменения испарения сток р.Волги уменьшился в 1975 г. на 1,67 км<sup>3</sup>, в результате регулирования увеличился на 12,51 км<sup>3</sup>.

Суммарное изменение стока за этот год составило 10,84 км<sup>3</sup>.

7. Относительная средняя квадратическая погрешность оценки изменения стока за счет изменения испарения составила 14%.

## 9.2. Упрощенная схема расчета

В случае отсутствия необходимых исходных данных для оценки влияния водохранилища на годовой и сезонный сток рек может быть применена упрощенная схема.

Расчеты по упрощенной схеме выполняются для среднего многолетнего периода с использованием в качестве исходной информации средних многолетних значений отдельных гидрометеорологических элементов и обобщенных гидрометеорологических материалов.

Объем потерь с зон затопления определяется по формуле

$$E_{\zeta} = 10^{-6} (\bar{A}'_{\hat{A}} - \bar{A}'_{\hat{N}}) \bar{F}_{\zeta}, \quad (9.15)$$

где  $\bar{A}'_{\hat{A}}$  и  $\bar{A}'_{\hat{N}}$  - средние многолетние значения слоя испарения с водной поверхности и суши для района расположения водохранилища, которые определяются по соответствующим картам или Указаниям [8,12].

Средняя площадь затопления рассчитывается приближенно в зависимости от типа водохранилища и проектной площади водного зеркала при НПУ с введением коэффициентов:

$$\bar{F}_{\zeta} = k_{\hat{I}} k_{\zeta} F_{\hat{I}\hat{O}}; \quad (9.16)$$

$$k_{\hat{I}} = \bar{F}_{\hat{A}} / F_{\hat{I}\hat{O}}; \quad (9.17)$$

$$k_{\zeta} = \bar{F}_{\zeta} / \bar{F}_{\hat{A}}. \quad (9.18)$$

Значение коэффициента  $k_{\hat{I}}$  определяется отношением фактической за период осреднения площади водного зеркала  $\bar{F}_{\hat{A}}$  к площади водохранилища при НПУ и зависит от характера регулирования стока (суточное, недельное, сезонное, многолетнее): для горных водохранилищ сезонного регулирования и равнинных суточного и недельного

регулирования  $k_I = 1$ , для равнинных водохранилищ сезонного регулирования  $k_I \approx 0,8...0,9$ .

Значение коэффициента  $k_C$  определяется отношением за период осреднения площади затопления к площади водного зеркала и зависит от вида водохранилища (речное, долинное, озерное) и от амплитуды колебания уровней воды в реке в естественных условиях. Для озерных водохранилищ (типа Рыбинского)  $k_C=1$ ; озерно-долинных (типа Камского, Ивановского)  $k_C \approx 0,8...0,9$ ; долинно-русловых (типа Куйбышевского)  $k_C \approx 0,7...0,8$  и русловых (типа Саратовского и Волгоградского)  $k_C \approx 0,6...0,7$ .

Потери стока с подтопленных территорий в случае отсутствия сведений о площадях подтопления можно приближенно принимать равным 4-10% величины  $E_C$ . Для гонных водохранилищ  $E_I = 0$ .

Изменение испарения в нижних бьефах водохранилищ определяется по формуле (9.9).

Величина  $\Delta S$  при расчетах годовых изменения стока за средний многолетний период для существующих водохранилищ (с установившимся режимом подземных вод) принимается равной нулю.

### **9.3. Прогноз возможных изменений стока под влиянием водохранилищ**

При прогнозных оценках водных ресурсов расчеты постоянных изменений годового и сезонного стока за счет создания водохранилищ производятся для средних многолетних условий и для лет заданной вероятности превышения. В зависимости от объекта проектирования расчеты выполняются либо для нормального подпорного уровня (НПУ),



либо для уровней, меняющихся в течение года в соответствии с принятым по проекту характером регулирования стока.

При определении расчетных параметров для проектируемых водохранилищ в ряде случаев используются приемы, отличающиеся от тех, которые были описаны для существующих водохранилищ.

Слой испарений с водной поверхности определяется в соответствии с Указаниями [12]. В качестве исходной информации используются данные гидрометеорологических наблюдений в районе будущего водохранилища или материалы специализированной водно-испарительной сети. Для приближенных оценок  $E'_B$  может быть использована карта изолиний этого параметра, помещенная в Указаниях.

Определение среднего многолетнего слоя испарения с поверхности суши производится с использованием методов, изложенных в работе [8].

Для определения слоя естественного стока с территории, которая отводится под водохранилище, используются приемы, описанные в предыдущем разделе. Кроме того, для определения средних многолетних значений  $Q'_C$  могут быть использованы региональные карты стока, публикуемые в монографиях «Ресурсы поверхностных вод СССР», или карта стока, составленная для территории СССР. В случае отсутствия надежных данных о годовых значениях  $Q'_C$  изменение годового стока может быть рассчитано по уравнению (9.15), в которое  $Q'_C$  не входит.

Приемы определения площади затопления  $F_C$  принципиально не отличаются от изложенных выше. Разница состоит в том, что вместо фактических средних площадей водохранилища за рассматриваемые интервалы времени принимаются проектные значения площади.

Изменения водных ресурсов в результате подтопления прилегающих к водохранилищу земель ( $E_I$ ) и в нижних бьефах

водохранилищ ( $\dot{A}_{i.a}$ ) определяются по тем же формулам, что и для существующих водохранилищ.

Для проектируемых водохранилищ оценка временных изменений водных ресурсов на заполнение мертвого объема чаши водохранилища  $S_{\dot{a}e}$  производится по кривой объемов для отметки УМО, устанавливаемой заданием на проектирование. При наполнении водохранилища в течение нескольких лет ежегодные объемы воды, идущие на затопление мертвого объема, определяются в соответствии с устанавливаемым режимом заполнения.

Потери, связанные с расходом речного стока на пополнение запасов подземных вод ( $S_{i.a}$ ), могут быть оценены по зависимостям (9.13) и (9.14).

*Пример.* Оценить изменение стока р. Ангары на перспективу при сооружении Богучанского водохранилища.

1. На р. Ангаре к 1990 г. намечается сооружение Богучанского водохранилища с полным объемом  $58,1 \text{ км}^3$ , полезным объемом  $2,3 \text{ км}^3$  и площадью зеркала  $2330 \text{ км}^2$ .

2. Слой дополнительных потерь на испарение с зоны затопления определим по формуле (9.3).

Параметры, входящие в эту формулу, определим следующим образом.

По данным метеостанций, расположенных в районе сооружения Богучанского водохранилища, норма осадков составит 366 мм.

Сток с площади затопления проектируемого водохранилища, рассчитанный по нескольким средним рекам, расположенным на данной территории, по материалам ОГХ т. 16 вып.2, составит 100 мм.

Испарение с водной поверхности будущего водохранилища, определенное по карте (прил. 1 Указаний [12]), 380 мм.

Слой дополнительных потерь на испарение 11 мм. Для определения объема дополнительных потерь площадей затопления определим с использованием коэффициентов  $k_i$  и  $k_\zeta$  по выражению (9.16). Она равна  $2330 \cdot 0,8 = 1864 \text{ км}^2$ . Объем дополнительных потерь на испарение составит  $0,21 \text{ км}^3$ .

3. Объем потерь с подтопленных территорий приближенно можно принять равным 5-10% от  $E_\zeta$ , т.е.  $0,01-0,02 \text{ км}^3$ .

4. Объемы временных потерь воды, которые пойдут на насыщение зоны аэрации ложа и берегов водохранилища в годы его наполнения и до наступления установившегося режима грунтовых вод, при расчете по формулам (9.13) и (9.14) при  $\mu = 0,10$  и  $H_{\dot{n}\delta} = 5i$  составят соответственно 1,1 и  $6 \text{ км}^3$ .

На заполнение мертвого объема водохранилища пойдет  $55,8 \text{ км}^3$  воды.

5. Изменение стока р. Ангары на уровень 1990 г. за счет сооружения Богучанского водохранилища в целом составит  $63,1 \text{ км}^3$ .

## ЛИТЕРАТУРА

1. Вуглинский В.С. К вопросу о методике учёта влияния водохранилищ на речной сток. – Труды ГГИ, 1981. вып. 274, с.73 – 85.
2. Крестовский О.И. Влияние вырубок и восстановления лесов на водность рек. -Л.: Гидрометеиздат, 1986. -118 с.
3. Куприянов В.В. Гидрологические аспекты урбанизации. – Л.: Гидрометеиздат, 1977. – 283
4. Методические рекомендации по определению потерь талых вод при прогнозах стока половодья равнинных рек Европейской территории РСФСР.- Л.; Гидрометеиздат, 1982. – 94с.
5. Методические указания управлениям гидрометслужбы. №90 – Л.: Гидрометеиздат, 1977. – 103 с.
6. Методические указания управлениям гидрометслужбы. №89 – Л.: Гидрометеиздат, 1974. – 96с.
7. Оценка изменений гидрологических условий под влиянием производственной деятельности. – М.: Недра, 1978. – 1978.-264 с.
8. Рекомендации по расчёту испарения с поверхности суши. – Л.: Гидрометеиздат, 1976. – 95с.
9. Рекомендации по приведению рядов речного стока и их параметров к многолетнему периоду. –Л.: Гидрометеиздат, 1979.- 64с.
10. Рекомендации по расчёту суммарного испарения с естественных угодий и сельскохозяйственных полей теплобалансовым методом.-Л.: Изд. ГГИ, 1971. -65с.
11. Родионов В.З. Влияние хозяйственной деятельности на сток р. Урала. – Труды ГГИ, 1977,239, с. 109 – 122.
12. Указания по расчёту испарения с поверхности водоёмов. – Л.: Гидрометеиздат, 1974. – 96 с.

13. Шелутко В.А. Техника статистических методов в гидрологии.- Л.: Изд – во ЛПИ, 1977.-174с

14. Шикломанов И.А. Антропогенные изменения водности рек .- Л.: Гидрометеиздат, 1979.- 302с.