

СТРАТЕГИЯ УПРАВЛЕНИЯ ВОДНЫМИ РЕСУРСАМИ В УСЛОВИЯХ АНТРОПОГЕННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ РЕЧНОГО СТОКА

В. Д. Красов

Воронежский государственный университет, Россия

Поступила в редакцию 27 февраля 2009 г.

Аннотация: В статье рассматривается недостаточно исследованная область гидрологии и водного хозяйства, связанная с оценкой влияния антропогенных изменений водности рек на параметры годового стока и его регулирования. Предлагается стратегия управления водными ресурсами, учитывающая антропогенный фактор, основанная на моделировании искусственных рядов стока и использующая в качестве критерия показатель надежности водоснабжения (расчетную обеспеченность).

Ключевые слова: водные ресурсы, антропогенный фактор, параметры стока и регулирования, стратегия управления, надежность водоснабжения.

Abstract: The article deals with the hydrology and water management areas that are not studied efficiently. The issue is connected with assessment of the impact of anthropogenic changes of water content of river that influences annual run-off character and its improvement. The author suggests the strategy of water resources management that includes anthropogenic changes and that is based on the modeling of artificial series of run-off. The strategy is used as the criterion for reliability indicator of water delivery (estimated frequency).

Key words: water resources, anthropogenic changes, annual run-off character and its improvement, management strategy, reliability indicator of water delivery.

Проблема управления водными ресурсами в условиях нарастающего антропогенного пресса является исключительно важной. Ее решение зависит от большого количества факторов. В наиболее общей постановке проблема относится к классу иерархических, многоуровневых, оптимизационных задач, где используются эколого-экономические критерии.

Модель системы управления водными ресурсами можно представить в виде следующих основных блоков (рис. 1).

Наличие прямых и обратных связей в управленческой модели позволяет учитывать изменения в состоянии объектов управления и осуществлять необходимую корректировку целей и решений.

Задачи подобного рода базируются на информации о закономерностях пространственно-временных колебаний стока рек и формах его использования. Но во многих случаях, когда в качестве критерия для выбора цели выступает норматив

надежности водоснабжения (расчетная обеспеченность), водохозяйственный блок имеет самостоятельное значение. Особую сложность проблема управления водными ресурсами приобретает в условиях нестационарности стокового процесса, возникающей как в связи с прямым воздействием хозяйственной деятельности на речной сток, так и из-за последствий прогнозируемых климатических изменений антропогенной природы [10, 13]. Это требует новых подходов к решению вопросов управления водными ресурсами.

Проблеме выявления характера воздействия хозяйственной деятельности человека и вызванных ею климатических изменений на сток рек посвящены работы многих авторов [1–4, 11–13]. Вместе с тем, некоторые концептуальные направления, имеющие важное научное и практическое значение, остаются недостаточно исследованными. К ним относится и оценка изменения гидрологических и водохозяйственных параметров под влиянием антропогенного фактора.

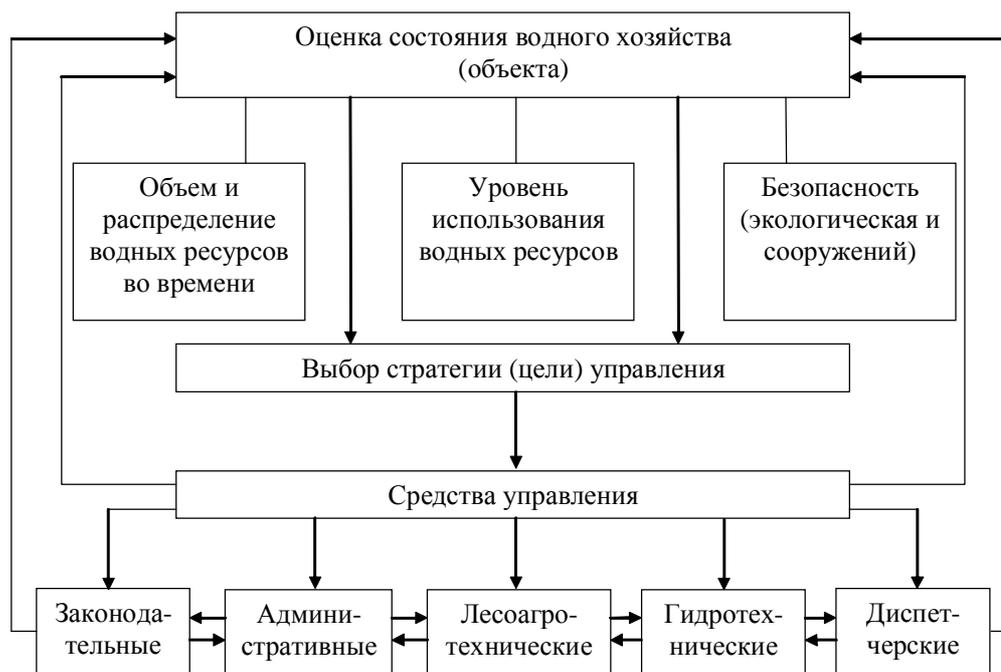


Рис. 1. Функциональная модель управления водными ресурсами

Гидрологические параметры

Степень влияния антропогенных изменений стока, постоянных по величине, на его параметры можно выявить на основе применения ранжированных вероятностных последовательностей [6]. Но при сценариях, детерминированных во времени, и для определения некоторых параметров (в частности, коэффициента автокорреляции) требуются хронологические последовательности. Результаты исследований по реальным рядам стока с минимальным нарушением естественного режима дают представление об основных тенденциях антропогенных изменений гидрологических параметров. Для получения более общих выводов необходимы длительные последовательности, моделируемые методом статистических испытаний (Монте-Карло) [7].

В дальнейшем будем опираться на теоретические концепции моделирования, разработанные Д. Я. Ратковичем [9]. Согласно им, вначале получают последовательности обеспеченностей стока с заданной автокорреляцией. Переход к искомым величинам стока осуществляется с помощью выбранного теоретического закона распределения вероятностей. В настоящей работе для этой цели применяется трехпараметрическое гамма-распределение С. Н. Крицкого и М. Ф. Менкеля [8].

Пусть имеем длительную объемом $N=gn$ последовательность модульных коэффициентов годового стока k_1, k_2, \dots, k_N с параметрами: среднее \bar{k} ,

стандарт σ , коэффициенты вариации C_v , асимметрии C_s и автокорреляции r , $\eta = C_s / C_v$ (n – объем выборки, g – число выборок).

Рассмотрим несколько сценариев антропогенного изменения стока:

для изъятия а) $a_{Иi} = \bar{a}_{И} = \lambda \bar{k} = \text{const}$, б) $a_{Иi} = c_1 \lambda \bar{k}$,

в) $a_{Иi} = c_2 \lambda \bar{k}$;

для увеличения: г) $a_{Пi} = \bar{a}_{П} = \lambda \bar{k} = \text{const}$,

д) $a_{Пi} = c_3 \lambda \bar{k}$, е) $a_{Пi} = c_4 \lambda \bar{k}$

($i=1, 2, \dots, N$ – для длительной последовательности, $i=1, 2, \dots, n$ – для выборки).

Условные обозначения: $a_{И}$ – изъятие стока; $a_{П}$ – увеличение стока; $\bar{a}_{И}, \bar{a}_{П}$ – их средние значения; $c_1=m/N$ (прямая), $c_2=(m/N)^2$ (парабола) – для последовательности; $c_3=m/n$ (прямая), $c_4=(m/n)^2$ (парабола) – для выборки; $0,1 \leq \lambda \leq 1,0$, $m=i$.

Модифицируем исходную последовательность по соотношениям:

$$\begin{aligned} k_i^* &= k_i - a_{Иi} \quad (\text{для изъятия}), \\ k_i^* &= k_i + a_{Пi} \quad (\text{для увеличения}) \end{aligned} \quad (1)$$

При этом, если $k_i^* < 0$, то $k_i^* = 0$. Далее получаем параметры измененной последовательности: среднее \bar{k}^* , стандарт σ^* , коэффициенты вариации C_v^* , асимметрии C_s^* , автокорреляции r^* , соотношение $\eta = C_s^* / C_v^*$. Кроме того, установим выборочные оценки параметров исходной (без звездочки) и модернизированной (со звездочкой $*$) последователь-

ностей: математические ожидания $M\bar{k}$, Mk^* , $M\sigma$, $M\sigma^*$, MC_v , MC_v^* , MC_s , MC_s^* , $M\gamma$, $M\gamma^*$, $M\eta$, $M\eta^*$, а также стандарты параметров: $\sigma_{\bar{k}}$, $\sigma_{\bar{k}^*}$, σ_{σ} , σ_{σ^*} , σ_{C_v} , $\sigma_{C_v^*}$, σ_{C_s} , $\sigma_{C_s^*}$, σ_{γ} , σ_{γ^*} , σ_{η} , σ_{η^*} (M – символ математического ожидания).

На рис. 2 представлены результаты численного эксперимента для случая с параметрами: $\bar{k}=1,0$, $C_v=0,5$, $C_s=1,0$, $r=0,3$, $N=50000$, $n=50$ (дан-

ные по смоделированной последовательности: $C_v=0,501$, $C_s=1,038$, $r=0,302$, $\eta=2,07$). Изменение стока задавалось в интервале: $0,1 \leq \lambda \leq 0,3$.

По результатам этого этапа исследований можно сделать следующие выводы. Основной из них – изменение некоторых параметров весьма значительное. Наиболее сильно на антропогенное изменение стока реагирует среднее значение \bar{k}^* , коэффициент вариации C_v^* и соотношение

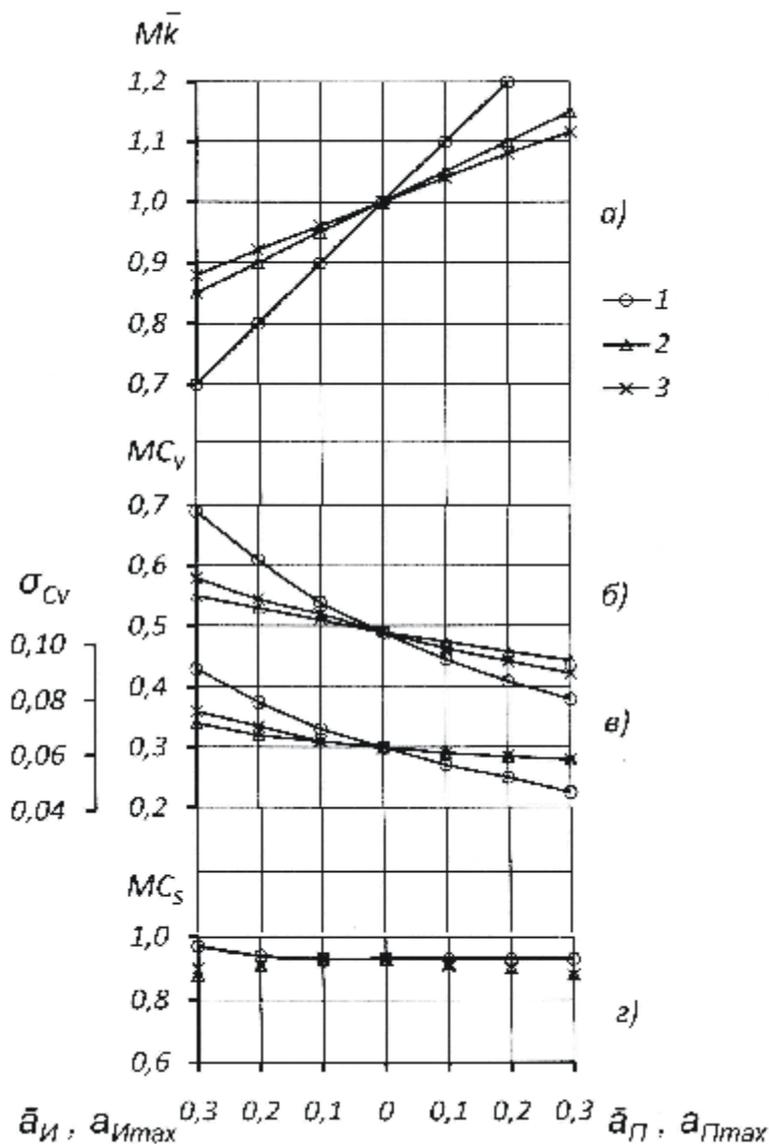


Рис. 2. Изменение выборочных параметров ($\bar{k}=1,0$, $C_v=0,5$, $C_s=1,0$, $r=0,3$, $N=50000$, $n=50$)

- а) среднее \bar{k}
- б) коэффициент вариации MC_v
- в) стандарт коэффициента вариации σ_{C_v}
- г) коэффициент асимметрии MC_s
- 1 – константа 2 – прямая 3 – парабола

$\eta^* = C_s^*/C_v^*$. Пределы изменения \bar{k}^* варьируют в соответствии со средней величиной трансформации стока по вариантам: в зоне изъятий при $\bar{a}_{и} = \text{const}$ \bar{k}^* уменьшается на величину $\bar{a}_{и\text{ф}}$ (фактическое изъятие): для прямой – на $0,5 \bar{a}_{и\text{ф}}$ и для параболы – на $0,33 \bar{a}_{и\text{ф}}$. В зоне повышения стока средние на те же величины возрастают. Коэффициент вариации C_v^* увеличивается в зоне изъятий и уменьшается при повышении стока. Его изменения относительно «естественных» условий являются наибольшими в вариантах $\bar{a}_{и\text{и}} = \bar{a}_{и} = \text{const}$ и $\bar{a}_{п\text{и}} = \bar{a}_{п} = \text{const}$ (возрастание выше 40%, уменьшение – 25%). Меньше отклонения по вариантам «прямая» и «парабола» (15–18% в сторону увеличения и 9–13% в сторону уменьшения). Оценка коэффициента асимметрии C_s^* смещена, меняется слабо и при $\bar{a}_{и\text{и}} = \text{const}$ и $\bar{a}_{п\text{и}} = \text{const}$, в основном, постоянна (некоторое увеличение в зоне изъятий $\bar{a}_{п} = 0,3$ вызвано влиянием «нулевого стока» [6]). В вариантах «прямая» и «парабола» C_s^* уменьшается на 10% при $\bar{a}_{и\text{макс}} = \bar{a}_{п\text{макс}} = 0,3$. Коэффициент автокорреляции r^* имеет небольшое отрицательное смещение. В рассмотренном диапазоне λ при $\bar{a}_{и} = \bar{a}_{п} = \text{const}$ значение r^* практически постоянно; при изменении стока по прямой или параболе слабо (~ на 7%) увеличивается. Оценка соотношения η^* смещена; при $\bar{a}_{и\text{и}} = \bar{a}_{и} = \text{const}$ имеет место

ее уменьшение на 26%, а при $\bar{a}_{п\text{и}} = \bar{a}_{п} = \text{const}$ на 23%. Менее значительно уменьшение в зоне изъятий для вариантов «прямая» (20%) и «парабола» (17%). Повышение стока для этих вариантов приводит к возрастанию η^* на 5–10%.

Стандарт \bar{k}^* постоянен и составляет около 0,1. Стандарт C_v^* колеблется от 0,045 до 0,084, увеличиваясь в зоне изъятий на 13–40% и уменьшаясь при повышении стока до 12–25% (в зависимости от варианта изменения стока). Стандарты C_s^* и r^* практически постоянны (0,48–0,50 для C_s^* , 0,14 для r^*). Стандарт η^* для зоны изъятий уменьшается с 0,90 для «естественного» уровня до 0,62 ($\bar{a}_{и\text{и}} = \bar{a}_{и} = \text{const}$), до 0,75 в вариантах «прямая» и 0,79 в вариантах «парабола». Повышение стока ведет к возрастанию стандарта η^* до 0,93 (вариант «парабола») и до 1,17 (вариант $\bar{a}_{п\text{и}} = \bar{a}_{п} = \text{const}$).

Параметры регулирования стока

Антропогенные изменения гидрологических параметров, естественно, сказываются и на водохозяйственных характеристиках. Рассмотрим вначале влияние различных сценариев изъятия на обеспеченность отдачи P и баланс водохранилища при заданной величине его полезной емкости β и гарантированной водоотдаче α . В качестве

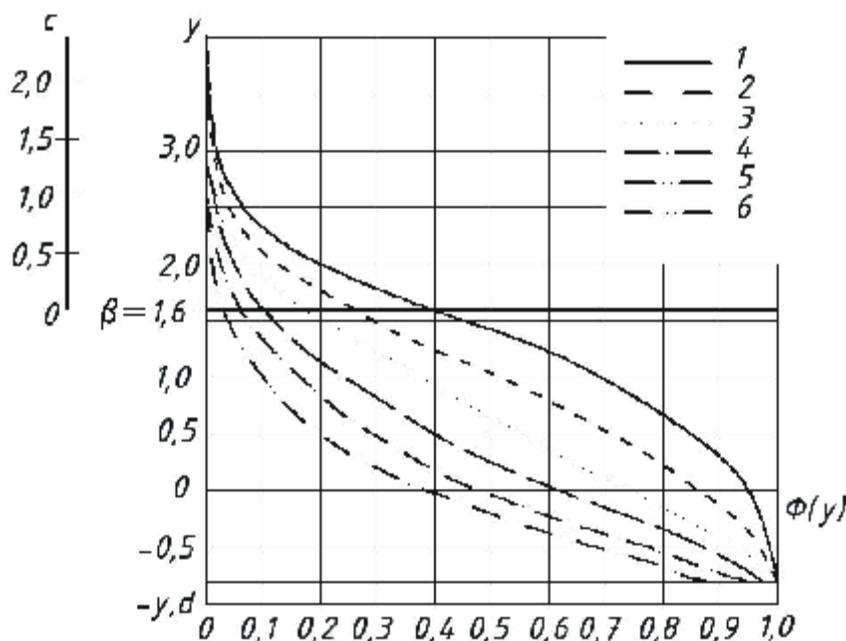


Рис. 3. Обобщенные водохозяйственные характеристики ($\bar{k}=1,0$, $C_v=0,5$, $C_s=1,0$, $r=0,3$, $P=0,95$, $\alpha=0,8$,

$\beta=1,6$)

- | | | |
|----------------------|----------------------|----------------------|
| 1) $\bar{a}_{и}=0$ | 2) $\bar{a}_{и}=0,1$ | 3) $\bar{a}_{и}=0,2$ |
| 4) $\bar{a}_{и}=0,3$ | 5) $\bar{a}_{и}=0,4$ | 6) $\bar{a}_{и}=0,5$ |

притока к водохранилищу используем полученные ранее длительные (10000 лет) смоделированные хронологические последовательности. Это позволяет представить итоговые показатели режима водохранилища в виде обобщенных водохозяйственных характеристик (ОВХ), которые выражают в вероятностной форме соотношение между различными составляющими баланса и надежностью водообеспечения. Система ОВХ при различных постоянных изъятиях ($0 \leq \bar{a}_{\text{п}} \leq 0,5$) для случая с параметрами ($\bar{k} = 1,0, C_v = 0,5, C_s = 1,0, r = 0,3, \alpha = 0,8, \beta = 1,6, P = 0,95$) представлена на рис. 3. Напомним, что параметры и элементы баланса водохранилища даются в долях нормы стока. Каждая из кривых отображает результаты регулирования стока при фиксированном изъятии. Значениями $y=0$ и $y = \beta$ кривая делится на три зоны: наполнений или гарантированной отдачи ($0 \leq y \leq \beta$), холостых сбросов ($y \geq \beta$) и дефицитов ($y < 0$). Абсцисса $\Phi(0)$ на кривых численно соответствует гарантированной надежности водообеспечения (расчетной обеспеченности отдачи водохранилища) P (по числу бесперебойных лет – в процентах или в долях от единицы). Соответственно, величина $q = 1 - \Phi(0)$ равна вероятности перебоя в воде; абсцисса $\Phi(\beta)$ характеризует вероятность холостых сбросов.

Использование ОВХ позволяет осветить условия поддержания урезанной отдачи в интервале обеспеченностей $(1,0 - P)$. В ОВХ дефицит гарантированной отдачи дается в пределах $0 \leq d \leq \alpha$. Между тем, в условиях реального водопользования большое снижение отдачи (особенно для ответственных потребителей) не допускается. Чтобы привести режим дефицита в соответствие с этим положением, необходима дополнительная полезная емкость $\Delta\beta$. Она может быть установлена по выражению:

$$\Delta\beta = \int_{P_y}^{1,0} (d - \xi\alpha) \cdot d_p - \int_P^{P_y} dd_p, \quad (2)$$

где P_y – вероятность превышения дефицита величиной $\xi\alpha$, ($0 < \xi < 1,0$).

Анализ ОВХ в широком диапазоне случаев ($C_v = 0,3 - 0,5, r = 0,0 - 0,3, P = 0,95$ и $0,90$) позволил установить, что уже изъятие из реки 10% стока ($\bar{a}_{\text{п}} = \text{const} = 0,1$) уменьшает надежность водообеспечения на 9–11%. Это ведет к увеличению числа перебойных лет и резкому повышению объема дефицита.

Данные, подтверждающие полученный результат, приведены в таблице 1, где дефициты водопотребления даются в форме математических ожиданий Md, Md^* (d – дефицит при $\bar{a}_{\text{п}} = 0, d^*$ – дефицит при $\bar{a}_{\text{п}} \neq 0$); P – принятая надежность водоснабжения ($\bar{a}_{\text{п}} = 0$), P^* – надежность водоснабжения в случае $\bar{a}_{\text{п}} \neq 0, \Delta P^*$ – уменьшение надежности водоподдачи, M – символ математического ожидания).

Дальнейший рост изъятия стока ведет к еще более масштабному уменьшению надежности водоснабжения и возрастанию дефицита.

Теперь необходимо установить, в каком соотношении между собой находятся те или иные сценарии изъятия с точки зрения воздействия на основные характеристики режима водохранилища. В таблице 2 приводятся необходимые данные, разъясняющие этот вопрос (M_c, M_c^* – математическое ожидание величины холостых сбросов, s и s^* – сбросы, соответственно, при $\bar{a}_{\text{п}} = 0$ и $\bar{a}_{\text{п}} \neq 0$).

Из таблицы 2 видно, что наибольшую трансформацию характеристик регулирования вызывает сценарий $\bar{a}_{\text{п}} = \text{const}$, наименьшую – изменение изъятия по параболе, промежуточную между ними – сценарий изменения изъятия по прямой; при этом

Таблица 1

Изменение надежности водообеспечения (P^*) и дефицита отдачи Md^* при изъятии речного стока ($C_s = 2C_v, \bar{a}_{\text{п}} = 0,1$)

| P | C_v | r | α | β | P^* | $\Delta P^* = P - P^*$ | $\Delta P^*/P, \%$ | Md | Md^* | Md^*/Md |
|------|-------|-----|----------|---------|-------|------------------------|--------------------|-------|--------|-----------|
| 0,95 | 0,3 | 0 | 0,8 | 0,34 | 0,84 | 0,11 | 12 | 0,005 | 0,023 | 4,6 |
| | | 0,3 | 0,8 | 0,48 | 0,84 | 0,11 | 12 | 0,006 | 0,026 | 4,3 |
| | 0,5 | 0 | 0,8 | 0,98 | 0,86 | 0,09 | 9,5 | 0,009 | 0,032 | 3,5 |
| | | 0,3 | 0,8 | 1,60 | 0,87 | 0,08 | 8,4 | 0,011 | 0,037 | 3,4 |
| 0,90 | 0,5 | 0 | 0,8 | 0,63 | 0,79 | 0,11 | 12 | 0,019 | 0,050 | 2,6 |
| | | 0,3 | 0,8 | 1,02 | 0,80 | 0,10 | 11 | 0,013 | 0,054 | 2,3 |

вариант прямой находится ближе к параболе. Такая особенность вполне согласуется с соотношением средних значений изъятия по сценариям: const 1,0, прямая 0,5, парабола 0,33.

Модель управления водными ресурсами

Согласно теоретическим концепциям ИВП РАН [5] современные модели управления водными ресурсами должны удовлетворять условиям: 1) отражать объективные закономерности стокового процесса; 2) применяться к любым формам использования стока; 3) быть гибкими, адаптированными к возможным направленным изменениям в многолетних колебаниях речного стока и водопотребления; 4) удовлетворять критерию подачи потребителям согласованного количества воды с заданной надежностью; 5) ориентированными на определенные средства достижения цели.

На базе перечисленных концептуальных положений предлагается модель управления водными ресурсами, состоящая из следующих блоков:

Блок А. Гидрологический. В нем предусматривается проведение следующих последовательных действий:

1. Моделирование длительной последовательности стока объемом N, обеспечивающим достаточную близость получаемых параметров ($k, \sigma, C_v, C_s, r, \eta$) с их заданными значениями.

2. Задание на период N варианта трансформации стока (на основе прогноза роста безвозвратного изъятия воды на хозяйственные цели, привлечения дополнительного стока из других бассейнов,

учета климатических изменений и влияния других факторов).

3. Формирование модифицированных последовательностей стока на период N с использованием соотношений (1). Эти последовательности рассматриваются в качестве возможного притока к водохранилищу.

Блок Б. Регулирование стока. Основной задачей блока Б является нахождение вида зависимостей гарантированной отдачи α_p^* водохранилища от показателей изменения стока рек.

1. *Вариант с наличием к началу трансформации стока водохранилища полезной емкостью b , гарантированной отдачей a и надежностью водоснабжения P .* В этом случае, по мере роста изъятия и понижения среднего многолетнего стока, создается возможность для дополнительного регулирования за счет освобождающейся части полезной емкости. Новая гарантированная отдача водохранилища α_p^* находится методом итераций: задание значения α_{pj}^* , построение при емкости β и заданной отдаче α_{pj}^* обобщенных характеристик водохранилища, установление текущей надежности водоснабжения P_j^* . Искомая гарантированная отдача устанавливается на основе соблюдения условия:

$$|P_j^* - P| \leq \epsilon_1, \quad (3)$$

где ϵ_1 – точность сравнения.

Таблица 2

Элементы режима водохранилища при различных сценариях изъятия во времени ($\bar{k}=1,0, C_v=0,5, C_s=1,0, P=0,95, \beta=1,6, \alpha=0,8, \bar{a}_{и}=\bar{a}_{и\max}=0,3$)

| Элементы режима в-ща | | Варианты изъятия | | | | | | | | | |
|----------------------|---------------|-------------------|------|------------------------------------|------------|------|-------|----------------------------------|------|-------|------------------------------------|
| | | $\bar{a}_{и} = 0$ | | $\bar{a}_{и} = \text{const} = 0,3$ | | | | Прямая ($\bar{a}_{и\max}=0,3$) | | | Парабола ($\bar{a}_{и\max}=0,3$) |
| Наименование | Хар-ки | Вел. | Вел. | Изм-е | % | Вел. | Изм-е | % | Вел. | Изм-е | % |
| Холостые сбросы | Mc, Mc* | 0,21 | 0,05 | -0,16 | -76 | 0,12 | -0,09 | -43 | 0,15 | -0,06 | -29 |
| | $\Phi(\beta)$ | 0,40 | 0,17 | -0,23 | -58 | 0,22 | -0,18 | -45 | 0,28 | -0,12 | -30 |
| Дефициты | Md, Md* | 0,01 | 0,15 | 0,14 | в 14 раз | 0,06 | 0,05 | в 5 раз | 0,04 | 0,03 | в 3 раза |
| | q | 0,05 | 0,38 | 0,33 | в 6,6 раза | 0,19 | 0,14 | в 2,8 раза | 0,14 | 0,09 | в 1,8 раза |
| Среднее наполнение | \bar{y} | 1,21 | 0,53 | -0,68 | -0,83 | 0,86 | -0,35 | -29 | 0,97 | -0,24 | -20 |
| Обеспеч-сть отдачи | $\Phi(0)$ | 0,95 | 0,62 | -0,33 | -35 | 0,81 | -0,14 | -15 | 0,86 | -0,09 | -9,5 |

По значениям α_p^* и показателям изменения стока строятся зависимости:

а) для уменьшения стока: $\alpha_p^* = f(a_{и})$ или $\alpha_p^* = f_1(a_{и\max})$;

б) для увеличения стока: $\alpha_p^* = \varphi(a_{п})$ или $\alpha_p^* = \varphi_1(a_{п\max})$.

Отметим, что в случае привлечения стока свободная емкость для регулирования отсутствует. Поэтому при $a_{пн} = \bar{a}_{п} = \text{const}$ новая отдача водохранилища в первом приближении будет $\alpha_p^* = \alpha + \bar{a}_{п}$. Напомним, что по условию задачи $\bar{a}_{п}$ рассматривается как изменение средней многолетней величины стока, поэтому прибавка в во-

доотдаче будет иметь расчетную обеспеченность, равную 1,0. Если в связи с этим возникает необходимость в увеличении полезной отдачи (при расчетной обеспеченности $P < 1,0$), то для этой цели понадобится дополнительная (сверх β) регулирующая емкость. Она может быть предусмотрена выше водохранилища по течению реки или в водохранилище-регуляторе на реке-доноре.

Величина дополнительной регулирующей емкости $\Delta\beta^*$ зависит от степени снижения гарантированной водоотдачи $\Delta\alpha^*$ и ее обеспеченности P и может определяться по формуле:

$$\Delta\beta^* = \Delta\alpha_y^*(1 - P), \quad (4)$$

где $\Delta\alpha_y^*$ – снижение отдачи водохранилища за пределами расчетной обеспеченности, в интер-

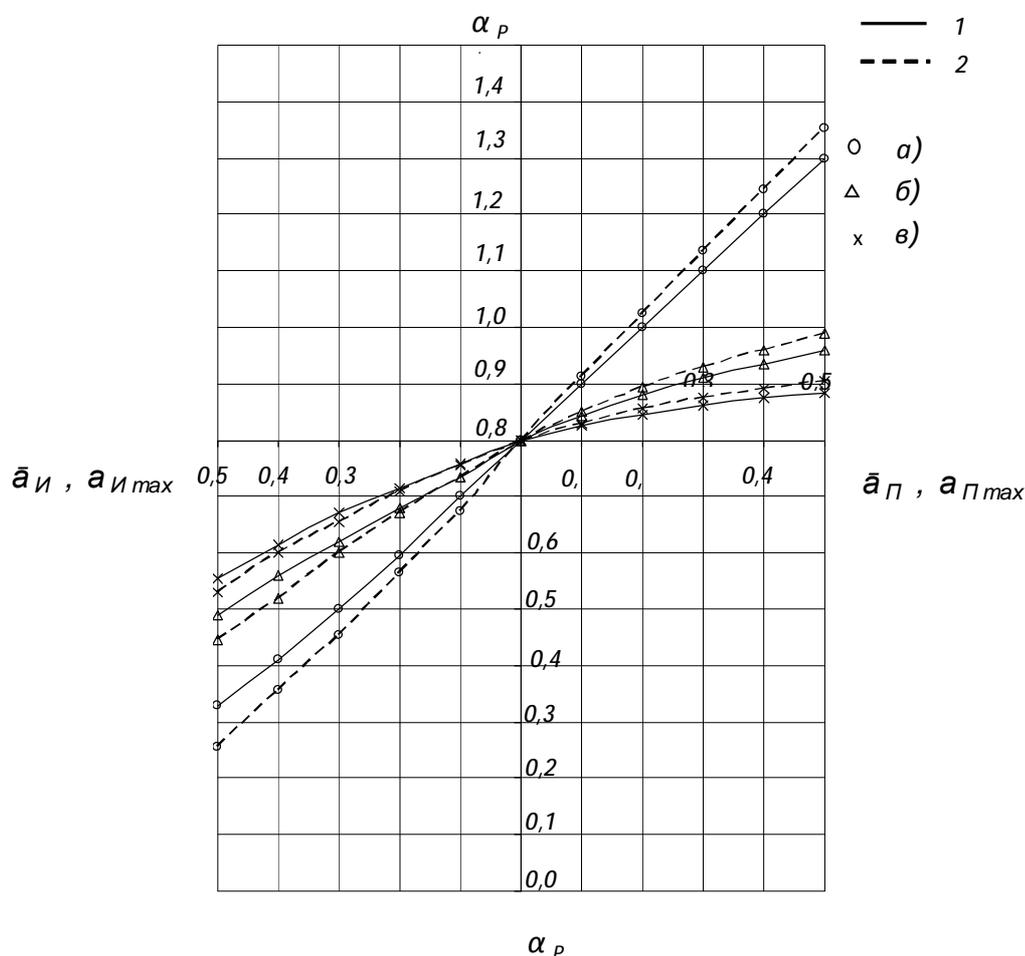


Рис. 4. Зависимости гарантированной отдачи водохранилища от изменения стока

$$(\bar{k} = 1,0, C_v = 0,5, C_s = 1,0, r = 0,3, P = 0,95, \alpha = 0,8, \beta = 1,55)$$

1. $\beta^* = \beta = \text{const}$ 2. $\beta^* = \beta = \text{var}$
- а) $a_{иn} = a_{и} = \text{const}, a_{пn} = a_{п} = \text{const}$
- б) $a_{иn} = \text{var}, a_{пn} = \text{var}$ (прямая)
- в) $a_{иn} = \text{var}, a_{пn} = \text{var}$ (парабола)

Соответственно, прибавка в гарантированной отдаче $\Delta\alpha^*$ будет:

$$\Delta\alpha^* = \Delta\alpha_y^* \frac{1-P}{P}, \quad (5)$$

Зависимости $\alpha_p^* = \varphi_1(\bar{a}_{\text{пmax}})$ отражают увеличение гарантированной отдачи сверх α , достигаемое в результате регулирования общего стока при неизменной емкости β только за счет улучшения структуры критических маловодных периодов.

2. *Вариант проектирования (или создания) к началу трансформации стока нового водохранилища.* Здесь необходимо оценить возможности регулирования стока при измененном притоке. Другими словами, следует установить, на какую гарантированную отдачу α_p^* можно рассчитывать при полезной емкости водохранилища β^* , отвечающей новой норме стока \bar{k} . Для решения такой задачи рекомендуется следующий подход. При фиксированном варианте изменения стока задается несколько значений водоотдачи: $\alpha_{p1}^*, \alpha_{p2}^*, \dots, \alpha_{pj}^*$. Затем определяется полезная емкость $\beta_j^* = \bar{k}^* \beta$ и находятся координаты обобщенной характеристики водохранилища. По абсциссе $\Phi_j(0)$ устанавливается надежность водоотдачи P_j^* . Отдача α_p^* , соответствующая P , находится по соотношению $|P_j^* - P| \leq \varepsilon_2$. Далее строятся зависимости:

а) для уменьшения стока $\alpha_p^* = f_2(\bar{a}_{\text{и}})$ или $\alpha_p^* = f_3(a_{\text{иmax}})$;

б) для увеличения стока $\alpha_p^* = \varphi_2(\bar{a}_{\text{п}})$ или $\alpha_p^* = \varphi_3(\bar{a}_{\text{пmax}})$.

Зависимости, выявленные в вариантах 1 и 2, могут быть использованы при выборе стратегии управления водными ресурсами в условиях антропогенного воздействия на сток при длительном периоде работы водохранилища с заданным режимом изменения притока.

3. *Вариант оценки режима водохранилища по коротким периодам.* В отличие от вариантов 1 и 2, характеристики режима водохранилища здесь зависят от наполнения водохранилища к началу изменения стока. Для разработки стратегии управления в отмеченном случае предлагается подход, особенности которого формулируются ниже.

Моделируется последовательность объемом $N_1 = n^* m_1$ членов (n^* – предстоящий период оценки режима водохранилища, m_1 – число отрезков пос-

ледовательности размером n^* ; наименьшая длина периода $n^*=1$). Вариант изменения стока реализуется в границах периода n^* . Обобщенные характеристики водохранилища при различных значениях α_p^* получаются с учетом наполнения x_n к началу периода n_j^* ($j=1, 2, \dots, m_1$) и для каждого интервала внутри n_j^* по времени (т.е. для i -го члена стокковой последовательности N_1). В результате будем иметь информацию о величине сбросов $M_{c_i}^*$, дефицитов $M_{d_i}^*$, надежности водоснабжения P_i^* и вероятности перебоя q_i^* . Искомая отдача α_p^* для периода n^* находится методом итераций при соблюдении условия: $|P_{j\text{min}}^* - P| \leq \varepsilon_3$, где P_{min} – наименьшая за период n^* надежность водообеспечения, ε_3 – заданная точность.

По значениям α_p^* , \bar{a} (или a_{max}) и x_n строятся зависимости вида $\alpha_p^* = \psi(\bar{a}, x_n)$ или $\psi_1(a_{\text{max}}, x_n)$, позволяющие назначать на протяжении периода n^* отдачу водохранилища, отвечающую заданной надежности P (\bar{a} , a_{max} – изменение стока безотносительно к его виду).

Прокомментируем характер полученных зависимостей, построенных для случая с параметрами: ($\bar{k}=1,0$, $C_v=0,5$, $C_s=1,0$, $P=0,95$, $\beta=1,6$, $\alpha=0,8$, $0,1 \leq \bar{a}_{\text{и}}$, $a_{\text{иmax}} \leq 0,3$). В группе вариантов зоны изъятия при $\beta^* = \beta$ уменьшение α_p^* в случае «константа» практически равно $\bar{a}_{\text{и}}$; эта тенденция замедляется при $\bar{a}_{\text{и}} = 0,4$ (на 6,7%) и $\bar{a}_{\text{и}} = 0,5$ (на 25%). Причина – следствие влияния интервала нулевого стока [7]. Другой фактор, связанный с тем, что изъятие $\bar{a}_{\text{и}}$ из нормы стока приводит к уменьшению гарантированной отдачи $\Delta\alpha > \bar{a}_{\text{и}}$, здесь сказывается незначительно. Так, для $\bar{a}_{\text{и}} = 0,5$ снижение отдачи в интервале $(1-P)$ на $\xi = 10\%$ дает $\Delta\alpha = -0,002$, что в пределах точности оценки. С уменьшением P и увеличением ξ величина $\Delta\alpha$ будет возрастать.

При нелинейном изменении $\bar{a}_{\text{и}}$ градиент снижения α_p^* увеличивается с ростом изъятия. Это подтверждает тот факт, что изменение водоотдачи водохранилищ здесь обусловлено не только уменьшением нормы стока, но и его последствиями: расширением границ критических маловодных периодов и уменьшением их стока.

В случае $\beta^* = \beta = \text{var}$ зависимости $\alpha_p^* = f_2(\bar{a}_и)$, $\alpha_p^* = f_3(a_{И\text{max}})$, ввиду меньшей полезной емкости водохранилищ, располагаются ниже варианта, соответствующего $\beta^* = \beta = \text{const}$. По мере роста изъятия разность отдач α_p^* отклоняется до 4,5–23,6% (первое число – вариант «парабола», второе – «константа»).

В зоне увеличения стока приращение отдачи в вариантах $\bar{a}_{пн} = \bar{a}_{п} = \text{const}$ практически аналогичны $\bar{a}_{п}$. В нелинейных случаях приращение α_p^* меньше, чем при таких же значениях изъятия. Здесь действует фактор уменьшения изменчивости стока и противоположная ему и более существенная причина – меньшие приращения гарантированной отдачи в области больших β^* . Поэтому, в отличие от зоны изъятий, кривые отдач при $\beta^* = \beta = \text{const}$ расположены ниже, чем при $\beta^* = \beta = \text{var}$. Это обусловлено режимом использования стока на протяжении многолетних периодов. Так, например, в первом случае M_c^* для $a_{п\text{max}} = 0,3$ в варианте «кривая» больше на 5,5%, в варианте «прямая» на 8%, при «константе» – на 19,5%.

Заметим, что величина необходимой полезной емкости в варианте $\beta^* = \beta = \text{var}$ в зависимости от фактической трансформации стока изменяется линейно:

$$\begin{aligned} \text{для зоны изъятия стока } \beta^* &= -0,76\bar{a}_{иФ}; \\ \text{для зоны повышения стока } \beta^* &= 0,76\bar{a}_{пФ} \end{aligned} \quad (6)$$

Здесь $\bar{a}_{иФ}$, $\bar{a}_{пФ}$ – средние значения фактического уменьшения и увеличения стока.

4. *Учет экологических требований.* В статье исследован широкий диапазон вариантов трансформации речного стока (до 50% среднесуточного значения). Разумеется, самые масштабные из них могут быть реализованы в реальных условиях лишь при неупорядоченном водопользовании. Здесь они рассмотрены лишь под углом зрения наибольшей общности предложенной теоретической концепции и отнюдь не означают неизбежности периодов полного прекращения стока реки. Согласно современным представлениям, реки должны быть сохранены не только как источники водоснабжения, но и как места обитания водной флоры и фауны, и как важные элементы природного ландшафта. Для этих целей в реке необходимо оставлять расход воды, удовлетворяющий эко-

логическим требованиям. Относительно его величины в литературе имеется много предложений (например [5]). Одно из них – минимальные приемлемые экологические условия в реке соответствуют среднемесячному расходу воды 95%-ой вероятности превышения за лимитирующий период. Независимо от величины экологического минимума, предложенные в настоящей статье подходы к исследованию последствий антропогенной нагрузки на водные объекты, могут быть использованы для оценки эффекта регулирования остаточного стока при закреплённой величине экологического расхода. Для этого необходимо вместо величин $\bar{a}_и$ использовать $k_э$ (экологический расход воды в долях нормы стока) и по описанным выше алгоритмам определить полезную емкость водохранилища β^* и гарантированную отдачу α_p^* необходимой обеспеченности P . Общая отдача α_c^* , таким образом, будет равна:

$$\alpha_c^* = \alpha_p^* + k_э \quad (7)$$

Ниже представлены результаты оценки возможностей регулирования стока с учетом экологических требований для случая с параметрами: $\bar{k} = 1,0$, $C_v = 0,3$, $C_s = 0,6$, $r = 0$, $k_э = 0,12$ (соответствует минимальному среднемесячному расходу лимитирующего периода на реках среднедонского района). Остаточный сток для регулирования в рассматриваемом случае равен $\bar{k}^* = 0,88$. При коэффициенте регулирования $\alpha = 0,8$ это дает отдачу $\alpha_p^* = 0,70$. Расчет регулирования по моделируемым последовательностям остаточного стока позволяет определить размер полезной емкости $\beta^* = 0,3$, при которой обеспеченность отдачи $\alpha_p^* = 0,70$ будет равна $P = 0,95$. Таким образом, суммарная отдача при наличии водохранилища составит $\alpha_c^* = 0,82$.

5. *Экономическая составляющая проблемы управления водными ресурсами.* Во всех предложенных выше вариантах управления не только не исключается применение стоимостных показателей, но, наоборот, имеются все возможности для их использования. Отправной позицией в этом отношении является наличие на ОВХ зоны распределения дефицитов отдачи $\Phi(d)$ и $\Phi(d^*)$ в интервалах $q = (1-P)$ и $q^* = (1-P^*)$. Задача выбора оптимального значения отдачи водохранилища α^* при известном притоке $k_j^* = L(t)$ его антропогенном изме-

нении $a_j^* = L_1(t)$ сводится к минимизации выражения:

$$M(u) = \int_0^{q^*} U(d^*) \Phi(d^*) dq, \quad (8)$$

где $M(u)$ – математическое ожидание ущерба, $U(d)$ – функция удельных ущербов от недодачи воды потребителям в объеме d , $\Phi(d^*)$ – обеспеченность дефицита d^* , t – время в годовом исчислении.

Функция $U(d)$ выражает стоимость альтернативных мероприятий по преодолению дефицита воды: создание иных источников энергии, резервирования продукции аналогичного вида и т.д.

В заключение отметим, что предлагаемая стратегия управления водными ресурсами ориентирована на достаточно широкий спектр возможных нестационарных сценариев развития водохозяйственной обстановки. Вариант 1 блока Б вполне адекватен условиям антропогенного изменения притока на протяжении длительного периода эксплуатации водохранилищ; раздел 2 применим для оценки параметров и режимов работы водохранилищ в составе водохозяйственных проектов. Раздел 3 позволяет рассматривать оба предшествующих сценария применительно к коротким периодам времени, что позволяет осуществлять более детальную корректировку режима водохранилищ. Кроме того, раздел 3 дает возможность оценки режима гарантированной отдачи в условиях нестационарности иного вида, определяемого первоначальным наполнением водохранилищ многолетнего регулирования. Раздел 4 совмещает специфику предшествующих разделов с учетом современных экологических требований к использованию природных ресурсов. И, наконец, раздел 5, при наличии стоимостных оценок ущербов от недодачи воды потребителям, открывает путь для оптимизации параметров и режимов работы водохранилищ в нестационарных условиях по экономическим критериям.

Красов Вячеслав Дмитриевич
кандидат технических наук, доцент кафедры природопользования факультета географии и геоэкологии Воронежского государственного университета, г. Воронеж, т. (4732)66-56-54, E-mail: root@geogr.vsu.ru

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бабкин В. И. Водный баланс речных бассейнов / В. И. Бабкин, В. С. Вуглинский. – Л.: Гидрометеиздат, 1982. – 191 с.
2. Бабкин В. И. Водные ресурсы СССР в настоящем и будущем / В. И. Бабкин, И. А. Шикломанов. – Л.: Гидрометеиздат, 1989. – 300 с.
3. Бабкин В. И. Многолетние колебания стока рек Волги, Оки, Дона, Днепра и методы его прогноза / В. И. Бабкин // Известия РАН. Сер. географическая. – 2008. – №3. – С. 92–98.
4. Болгов М. В. Современные проблемы оценки водных ресурсов и водообеспечения / М. В. Болгов, В. М. Мишон, Н. И. Сенцова. – М.: Наука, 2005. – 318 с.
5. Управление водным хозяйством на современном этапе / В. И. Данилов-Данильян [и др.] // Обоснование стратегий управления водными ресурсами. – М., 2006. – С. 16–28.
6. Дубинина В. Г. О методологии нормирования безвозвратного изъятия речного стока / В. Г. Дубинина // Стратегические проблемы водопользования России. – М., 2008. – С. 205–214.
7. Красов В. Д. Трансформация гидрологических параметров под воздействием крупномасштабных изъятий стока / В. Д. Красов // Вестник Воронеж. гос. ун-та. Сер. География. Геоэкология. – 2008. – №1. – С. 116–120.
8. Красов В. Д. Применение моделированных последовательностей при оценке антропогенного воздействия на сток рек / В. Д. Красов, П. С. Лысачев // Материалы девятой международной научно-методической конференции. – Воронеж, 2009. – С. 375–378.
9. Крицкий С. Н. Гидрологические основы управления водохозяйственными системами / С. Н. Крицкий, М. Ф. Менкель. – М.: Наука, 1982. – 271 с.
10. Раткович Д. Я. Многолетние колебания речного стока / Д. Я. Раткович. – Л.: Гидрометеиздат, 1976. – 255 с.
11. Шикломанов И. А. Антропогенные изменения водности рек / И. А. Шикломанов. – Л.: Гидрометеиздат, 1979. – 302 с.
12. Шикломанов И. А. Влияние хозяйственной деятельности на речной сток / И. А. Шикломанов. – Л.: Гидрометеиздат, 1989. – 334 с.
13. Шикломанов И. А. Влияние климатических изменений на водные ресурсы и водный режим / И. А. Шикломанов, В. Ю. Георгиевский // Всемирная конференция по изучению климата. – М., 2003. – С. 250.

Krasov Vyacheslav Dmitriyevitch
Candidate of Technical Sciences, assistant professor of management of nature department of faculty of geography and geocology of Voronezh State University, Voronezh, tel. (4732) 66-56-54, E-mail: root@geogr.vsu.ru