

## СТРАТЕГИЯ УПРАВЛЕНИЯ РЕЧНЫМ СТОКОМ В УСЛОВИЯХ ЕГО НЕСТАЦИОНАРНОСТИ

Красов В.Д.

Воронежский государственный университет, г. Воронеж,  
v\_d\_krasov@mail.ru

Под управлением поверхностными водными ресурсами понимается всякое воздействие на речной сток, осуществляемое с целью рационального использования и устойчивого развития природных систем. Теоретические основы такого управления исследовались в трудах В.И. Данилова-Данильяна, В.Г. Пряжинской, И.Л. Храновича [1], а также в работах зарубежных авторов: J.F. Craig, D.P. Loucks, P. Nijkamp, Z. Kaczmarek и др.

Важная (а в некоторых случаях – при недостатке насыщения экономической информацией) и основная роль в разработке управленческих моделей названного типа принадлежит гидролого-водохозяйственной составляющей – С.Н. Крицкий, М.Ф. Менкель [2]. При этом стадию выбора параметров водохранилищ, продуцирующую величины полезного объема, гарантированной отдачи, холостых сбросов и дефицитов, необходимых для экономического и экологического анализа, можно отнести к стратегическим элементам модели. Диспетчерские графики работы водохранилища при выбранных параметрах являются инструментом оперативного управления.

В [3] разработана стратегия управления поверхностными водными ресурсами в условиях нестационарности, использующая в качестве критерия оптимальности надежность водообеспечения (расчетную обеспеченность). Она отображает внутреннюю организацию получения информации для инстанций и лиц, принимающих решения в области водохозяйственного строительства и природообустройства. Стратегия имеет следующую структуру.

*Блок А (гидрологический)*, содержащиеся в нем подблоки предусматривают:

1. Анализ однородности и репрезентативности исходной информации по стоку.
2. Моделирование длительной последовательности стока объемом  $N$ , обеспечивающим достаточную близость получаемых параметров (нормы стока  $\bar{k}$ , стандарта  $\sigma$ , коэффициентов вариации

ции  $C_v$ , асимметрии  $C_S$ , и автокорреляции  $r$ , соотношения  $\eta = C_S / C_v$  с их заданными значениями.

3. Принятие на период  $N$  сценария 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).

4. Формирование модифицированных последовательностей стока на период  $N$ . Эти последовательности рассматриваются в качестве возможного притока к водохранилищу.

Блок Б (регулирование стока в процессе управления водными ресурсами). Его основной задачей является выявление динамики гарантированной отдачи и других параметров водохранилища в зависимости от показателей изменения стока рек, получаемых в гидрологическом блоке.

В соответствии со спецификой водохозяйственных задач в блоке Б предусматриваются подблоки:

I. Многолетнего режима водохранилища, в котором оценивается динамика его основных параметров (полезный объем  $\beta$ , гарантированная отдача  $\alpha$ , надежность водоснабжения  $P$ ) в зависимости от сценария трансформации притока (величины  $\beta$  и  $\alpha$  выражены в долях нормы стока).

II. Режим первоначального наполнения, который рассматривается при выбранных параметрах водохранилища, и в свою очередь, может существенно влиять на их величину. В каждом из указанных выше подблоков может оцениваться режим водохранилища в двух вариантах: эксплуатационном и проектном. Для подблока I эксплуатационный вариант соответствует наличию водохранилища полезной емкостью  $\beta$  к началу трансформации притока, с гарантированной отдачей  $\alpha$  и надежностью водоснабжения  $P$ . Возникает задача – оценить новую гарантированную отдачу  $\alpha^*$  при изменившемся притоке и прежней надежности водоснабжения. Функцией проектного варианта является оценка всего комплекса характеристик режима водохранилища при трансформированном стоке на основе рассмотрения различного сочетания параметров регулирования.

Указанные выше подблоки и варианты модели могут быть задействованы в трех подвариантах. Первый: 1-р и 2-р, что соот-

ветствует применению в качестве критерия оптимальности норматива надежности водообеспечения; второй: 1-э и 2-э, что указывает на использование при оценке оптимальности экономических критериев; третий: 1-эк и 2-эк, при которых учитываются экологические требования.

Центральным звеном научно-методических построений в рамках предлагаемой стратегии является получение координат  $y_i$  обобщенных водохозяйственных характеристик (ОВХ) на основе решения уравнения водного баланса водохранилища за период  $N$  лет с использованием модифицированных последовательностей, позволяющего определять результирующие балансы  $y_{pi}$  в пределах выбранных временных отрезков ( $i=1,2,\dots,N$ ). При годовом осреднении величин речного стока значения результирующих будут:

$$y_{pi} = x_i' + k_i^* - \sum_i (a_i + d_i) - \alpha, \quad (1)$$

где  $y_{pi}$  – результирующая балансы ( $i=1,2,\dots,N$ ),  $x_i'$  – наполнение водохранилища к началу года (при  $i=1$   $x_i' = 0$ , при  $i > 1$   $x_i' = y'_{i-1}$ ),  $y_i' - 1$  – наполнения водохранилища к концу ( $i-1$ ) года,  $k_i$  – немодифицированный приток,  $a_i$  – изъятие стока,  $d_i$  – дефицит стока ( $d_i < 0$ ),  $\alpha$  – полезная отдача водохранилища.

Найденные значения  $y_{pi}$  путем ранжирования по убыванию преобразуются в величины  $y$ , представляющие собой ординаты ОВХ, соответствующие различным вероятностям превышения  $\Phi(y) = m / N + 1$ , где  $m$  – ранг величин в убывающей последовательности.

В результате получаем  $N$  пар координат характеристики, которая в вероятностной форме отображает основные элементы режима водохранилища. Кривая ОВХ в общем случае является непрерывной функцией притока и других параметров. Вместе с тем, она обладает важным свойством: в отдельных зонах ею характеризуются распределение вероятностей наполнений  $y'$  водохранилища, холостых сбросов  $c$  и дефицитов отдачи  $d$ :

$$y' = y \text{ (в пределах } 0 \leq y \leq \beta \text{)}, \quad c = y - \beta \text{ (в пределах } y > \beta \text{)}, \\ d = y \text{ (при } y < 0 \text{)}. \quad (2)$$

На рис.1 представлена ОБХ для сочетания параметров стока и регулирования: норма стока  $\bar{k}=1,0$ ; коэффициенты вариации  $C_v=0,5$ ; асимметрии  $C_s=1,0$ ; автокорреляции  $r=0,3$ ; гарантированная отдача водохранилища  $\alpha=0,8$ ; полезная емкость водохранилища  $\beta=1,6$ ; надежность водообеспечения (расчетная обеспеченность)  $P=0,95$  для разных значений изъятия ( $\lambda=0 \div 0,5$ , где  $\lambda$  – максимальное изъятие в долях нормы стока).

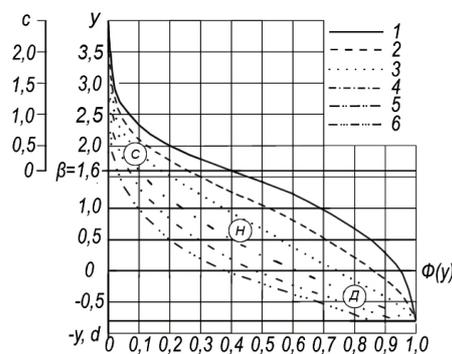


Рис. 1 – Обобщенная водохозяйственная характеристика (ОБХ)  
1-6 – варианты  $\lambda$ ; С – холостые сбросы; Н – наполнения; Д – дефициты

На ОБХ выделены зоны наполнений, холостых сбросов и дефицитов водоотдачи. По абсциссе  $\Phi(y=0)$  можно судить о надежности водоснабжения  $P$ , разность  $1-\Phi(y=0)$  характеризует вероятность наступления перебоев. Абсциссы  $\Phi(y \geq \beta)$  обозначают вероятность наступления холостых сбросов воды.

**Учет экологических требований.** Независимо от величины и внутригодового режима экологического минимума, предложенные подходы адаптированы к их удовлетворению. В этой связи следует отметить, что предлагаемая стратегия управления поверхностными водными ресурсами обладает важным свойством: используемая в ее алгоритмах величина  $a_{\text{ли}}$  в  $i$ -ом интервале времени может рассматриваться не только как изъятие стока выше водохранилища, но и как обязательный объем попусков из него для экологических целей  $a_{\text{эi}}$ . В этом случае средняя величина остаточного стока  $\bar{k}_0 = \bar{k} - \bar{a}_{\text{э}}$  представляет собой предел, который может быть использован для регулирования ( $\bar{a}_{\text{э}}$  – средний объем экологического попуска за  $N$  лет). В случае необходимости обеспечить «экологический» гидро-

граф в рамках предложенной стратегии следует полагать  $a_{Иi} = a_{Эi}$  ( $a_{Эi}$  – годовой объем «экологического» гидрографа). Требуемый объем экологического попуска за  $j$ -й внутригодовой интервал  $i$ -го года  $a_{Эij}$  можно получать по соотношению:  $a_{Эij} = a_{Иij} = \gamma_{Иij} a_{Эi}$ , где  $\gamma_{Иij}$  – доля  $a_{Эij}$  в годовом объеме  $a_{Эi}$  «экологического» гидрографа,  $i=1,2,\dots,N$  ( $N$  – число лет в последовательности стока),  $j=1,2,\dots,m_1$  ( $m_1$  – число внутригодовых интервалов).

Таким образом, в случае учета экологических требований, получаемые в гидрологическом блоке для сценариев изъятия водных ресурсов результаты исследований по динамике параметров, квантилей стока, его выборочных оценок можно в полной мере отнести к характеристикам остаточного стока.

**Экономическая составляющая управления.** Во всех предложенных выше подвариантах не только не исключается применение стоимостных показателей, но, наоборот, имеются все возможности для их использования. Отправной позицией в этом отношении является наличие на ОВХ в рассматриваемых сценариях изъятия зоны интегральной функции распределения дефицитов  $\Phi(d^*)$  при отдаче  $\alpha^*$  в интервале  $q^*=1-P^*$  ( $d^*$  – дефицит отдачи при заданном изъятии,  $P^*$  – обеспеченность отдачи,  $q^*$  – вероятность перебоя,  $\Phi$  – символ функции, “\*” – знак модификации стока). Задачи выбора оптимального значения  $\alpha^*_{опт}$  сводится к минимизации выражения:

$$M(S) = \int_0^{\alpha} y U(y) \Phi'(y) dy, \quad (3)$$

где  $M(S)$  – математическое ожидание суммарных затрат,  $y$  – ордината ОВХ,  $U(y)$  – функция удельных затрат от недодачи воды потребителям в объеме  $y=d^*$ , представляющая собой разность между ущербами  $F(d^*)$  от дефицита воды и стоимостью мероприятий  $R(d^*)$  по его преодолению (создание иных источников воды или энергии, резервирование продукции аналогичного вида и т.п.),  $\Phi'(y)$  – плотность распределения вероятности функции  $\Phi(y)$ .

**Исследование динамики параметров регулирования стока.** На основе разработанной стратегии исследована динамика параметров регулирования, оценены пределы их трансформации в зависимости от изменения стока (как в сторону уменьшения, так и при увеличении). На рис. 2 представлена зависимость гарантированной

отдачи водохранилища  $\alpha_p^*$  при ее обеспеченности  $P$  от величины изъятия  $\bar{a}_{II}$  и увеличения стока  $\bar{a}_{II}$  для сценариев а, б, в и двух вариантов: эксплуатационного (1) и проектного (2).

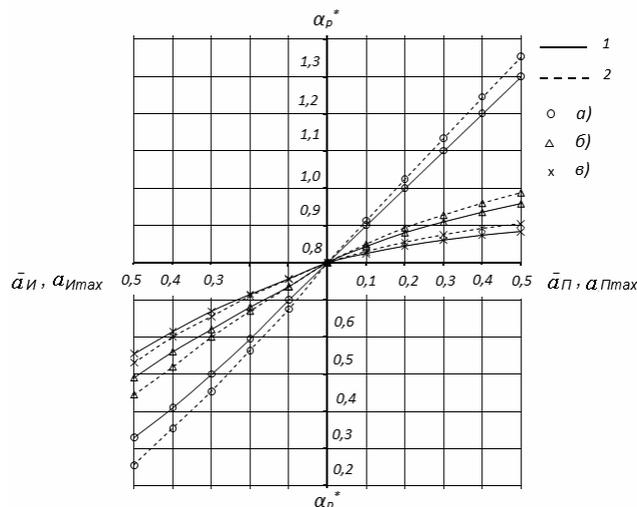


Рис. 2 – Изменение гарантированной отдачи водохранилища от величин изъятия  $\bar{a}_{II}$  и увеличения  $\bar{a}_{II}$  стока в вариантах: 1 и 2;

$a_{II\max}, a_{II\max}$  – максимальное изъятие и увеличение стока  
(а – константа; б – прямая; в – парабола-1)

Из анализа рис. 2 видно, что в группе сценариев зоны изъятия в эксплуатационном варианте (при  $\beta^* = \beta$ ) уменьшение  $\alpha_p^*$  до  $\bar{a}_{II} = 0,3$  в сценарии «константа» практически равно изменению  $\bar{a}_{II}$ ; эта тенденция замедляется при  $\bar{a}_{II} = 0,4$ , (на 6,7%) и  $\bar{a}_{II} = 0,5$  (на 25%), что является следствием влияния интервала нулевого стока. В сценариях нелинейного изменения  $\alpha_{II}^*$  градиент снижения  $\alpha_p^*$  увеличивается с ростом изъятия повсеместно. 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 зоне увеличения стока приращения отдачи в случаях  $a_{II} = \bar{a}_{II} = const$  практически аналогичны изменению  $\bar{a}_{II}$ . В нелинейных случаях возрастание  $\alpha_p^*$  ниже, чем при таких же значениях

изъятия – из-за меньшей степени использования стока за счет холостых сбросов.

**Учет внутригодовых колебаний стока** позволяет рассматривать полезный объем водохранилища как единый параметр и ввести оценку надежности не только по числу бесперебойных лет  $P_L$ , но и по числу бесперебойных внутригодовых интервалов (месяцев)  $P_M$ . Оценка динамики параметров регулирования для данного случая проведена применительно к условиям Цимлянского водохранилища на р. Дон. В процессе исследований не только установлены пределы изменения гарантированной отдачи и ее надежности в зависимости от изъятия (см. рис. 3), но и получены рекомендации в отношении величины «рыбного» попуска при современном уровне безвозвратных потерь стока.

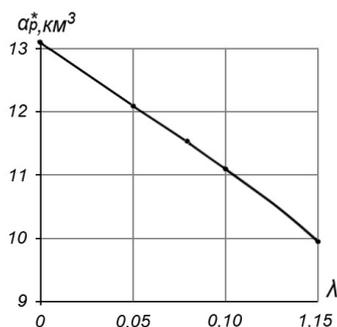


Рис. 3 – Зависимость гарантированной отдачи Цимлянского водохранилища от изъятия стока (при изъятии из внутригодовых значений стока)

Выявлена устойчивость в рассмотренном диапазоне изъятий разности между оценками надежности водообеспечения по числу бесперебойных месяцев и бесперебойных лет.

По мнению автора, программы по использованию ресурсов стока р. Дон выше Цимлянского гидроузла, связанные с безвозвратными отъемами стока реки, могут негативно сказаться на водопользовании в низовьях р. Дон. Проблема водообеспечения в бассейне р. Дон должна решаться на основе концепции интегрированного управления водными ресурсами [4].

### Литература

1. Данилов-Данильян В.И., Хранович И.Л. Управление водными ресурсами. Согласование стратегий водопользования. – М.: Научный мир, 2010. 230 с.

2. *Крицкий С.Н.* Гидрологические основы управления водохозяйственными системами / С.Н. Крицкий, М.Ф. Менкель. – М.: Наука, 1982. – 271 с.

3. *Красов В.Д.* Управление поверхностными водными ресурсами в условиях нестационарности – Воронеж: Изд. Научная книга, 2014. – 252с.

4. *Косолапов А.Е.* Опыт применения принципов интегрированного управления водными ресурсами Схем КИОВО // Сборник научных трудов Всероссийской научной конференции «Устойчивость водных объектов, водосборных и прибрежных территорий; риски их использования». Калининград: Капрос, 2011. С.216-222.

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ  
ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ  
СОЗДАВАЕМЫХ ВОДОХРАНИЛИЩ  
НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ В КРИОЛИТОЗОНЕ  
(на примере Нижне-Богучанского водохранилища)**

Курбатова И.Е.

Институт водных проблем РАН, г. Москва

irenkurb@yandex.ru

Регулирование режима речного стока с помощью водохранилищ ради решения широкого круга хозяйственных задач является одним из самых кардинальных вмешательств человека в естественную жизнь реки и прилегающих территорий, которое провоцирует значительные природные и социально-экономические изменения. Строительство такого крупного водохозяйственного объекта как водохранилище требует проведения государственной экологической экспертизы, а на самом раннем предпроектном этапе - выполнения оценки воздействия на окружающую среду (ОВОС). Последняя задача многофакторная, поскольку влияние водохранилищ на окружающую среду разнообразно и неодинаково как в разных географических регионах и высотных поясах, так и на разных участках водоема. Специфические особенности и масштабы влияния русловых водохранилищ на прилегающие территории должны быть обязательно выявлены при разработке информационного обеспечения конкретного водоема и учтены при выполнении ОВОС.

К одним из наиболее сложных по комплексу последствий относятся водохранилища, создаваемые в зоне многолетней мерзлоты.