

НЕСТАЦИОНАРНОСТЬ В СЛОЖНЫХ ВОДОЗОЯЙСТВЕННЫХ СИСТЕМАХ (НА ПРИМЕРЕ ИЛИ-БАЛХАШСКОЙ ВОДНОЙ СИСТЕМЫ)

В. Д. Красов

Воронежский государственный университет, Россия

Поступила в редакцию 10 ноября 2010 г.

Аннотация: В статье исследуется влияние антропогенных факторов, определяющих нестационарность водного баланса и уровня оз. Балхаш (безвозвратное изъятие речного стока на орошение, первоначальное наполнение Капшагайского водохранилища). В качестве моделей притока к озеру используются ряды стока р. Или и рек, впадающих в восточную часть озера, а также искусственные взаимозависимые последовательности.

Ключевые слова: Или-Балхашская водная система, антропогенный фактор, нестационарность, оценка режима.

Abstract: The article deals with the influence of anthropogenic factors determining the nonstationarity of water balance and the level of the Balkhash Lake (irretrievable withdrawal of the runoff for irrigation, initial filling of the Kapshagai water reserve). The author uses the runoff rows of the Ili river and the rivers flowing into the eastern part of the lake as well as the artificial interdependent sequences as the models of tributaries.

Key words: Ili-Balkhash water system, anthropogenic factor, nonstationarity, regime assessment.

Исследованию различных аспектов режима сложных систем посвящены фундаментальные работы, например [6]. Вопросы методики их расчета при наличии многолетних регуляторов стока, бессточных озер и внутренних морей рассматриваются в [1, 2, 3, 4, 5, 7, 9]. К числу характеризуемых систем относится Или-Балхашская водная система в Казахстане. В динамике ее развития элементы нестационарности выражены достаточно отчетливо. Они обусловлены развитием орошения и первоначальным наполнением Капшагайского водохранилища. Названные факторы в конечном итоге приводят к нестационарности в режиме уровня оз. Балхаш.

Общая характеристика системы

Озеро Балхаш – крупнейший бессточный водоем. Длина его около 600 км, ширина от 25 до 70 км, глубина от 5 (западная часть) до 27 м (восточная часть), объем при среднем естественном уровне 342,0 м около 105 км³, площадь зеркала 18,2 тыс. км². Озеро состоит из двух частей: западной – пресноводной и восточной – солоноватоводной; соединяются они проливом Узун-Арал. Западная часть оз. Балхаш является источником водо-

снабжения промышленных предприятий и населенных пунктов Прибалхашья.

Река Или, впадающая в западную часть озера, является его основной питающей артерией, приносящей до 80 % общего притока. Основная часть стока р. Или формируется на территории КНР. На р. Или в 1970 г. создана Капшагайская ГЭС (в дальнейшем КГЭС) с водохранилищем многолетнего регулирования стока. Норма стока реки в створе КГЭС составляет 14,9 км³ при среднем расходе воды 472 м³/с. При впадении в озеро р. Или образует обширную дельту площадью около 8 тыс. км², являющуюся гигантским естественным испарителем воды. Естественный сток р. Или на участке створ КГЭС – вершина дельты р. Или остается практически неизменным. Средний естественный сток рек, впадающих в восточную часть озера, составляет 3,1 км³.

В многолетнем ходе естественного уровня оз. Балхаш прослеживаются длительные фазы подъема и спада. Наивысший уровень озера за период 1879-1970 г. оценивается отметкой 344,5 м, наинизший 340,6 м (амплитуда 3,9 м). Более подробные данные о многолетних колебаниях водного баланса и уровня оз. Балхаш приведены в работах [2, 3].

Принятая в проекте отметка НПУ Капшагайского водохранилища, равная 485,0 м, соответствует полному статическому объему 28,14 км³, что в 1,9 раза превышает норму годового стока. Полезная емкость при сработке до отметки УМО 481,0 м предусматривалась равной 6,64 км³. Мертвый объем водохранилища был назначен в 21,5 км³, или около полутора средне-многолетних объема стока.

Одновременно с созданием весьма емкого Капшагайского водохранилища в проекте намечалось интенсивное развитие орошения выше и ниже створа КГЭС. Годовой объем полезной водоотдачи 95 %-ной обеспеченности (по числу бесперебойных лет) при дополнительных к началу заполнения водохранилища безвозвратных отъемах стока р. Или выше створа КГЭС на орошение в размере 1,35 км³ в год определен в объеме 10,45 км³. Потери на испарение с зеркала водохранилища оценивались в 1,45 км³ в год.

Предлагаемый подход к оценке водного режима Или-Балхашской системы

Причинно-следственные связи в Или-Балхашской системе исключительно сложны, и их необоснованное нарушение по воздействию антропогенных факторов, как показывает опыт, может привести к нежелательным последствиям. В свете сказанного подход к гидролого-водохозяйственному обоснованию гидротехнических и агрометеорологических проектов должен в максимальной степени учитывать особенности функционирования систем такого вида. Далее излагается предложенный автором метод оценки водного режима Или-Балхашской водной системы, включающий в себя учет прямых и обратных связей между ее элементами. Названный принцип обусловлен, в первую очередь, тем фактом, что состояние водного баланса и уровня оз. Балхаш влияют на режим Капшагайского водохранилища, а последнее по отношению к оз. Балхаш выполняет функции своеобразного компенсатора. Это взаимодействие осложняется наличием потерь стока в дельте р. Или и развитием ирригации.

Одним из важных моментов предлагаемого подхода является учет при определении объема попусков из Капшагайского водохранилища водообмена между западным Балхашом (в дальнейшем ЗБ) и восточным Балхашом (в дальнейшем ВБ). В естественных условиях происходил переток слабоминерализованной воды из ЗБ в ВБ (в среднем около 2,5 км³ в год [2, 3]). Благодаря наличию перетока создается противодействие поступлению более минерализованной воды из ВБ в ЗБ.

При отсутствии перетока или его уменьшении перенос водных масс и результирующая солевого обмена могут быть направлены из ВБ в ЗБ, что приведет к увеличению минерализации воды в ЗБ. При отсутствии перегораживающей озеро перемычки в проливе Узун-Арал, попуски из Капшагайского водохранилища должны назначаться, исходя из необходимости поддержания перетока вод из ЗБ в ВБ в заданном объеме.

Подход к оценке водного режима Или-Балхашской системы исходит из наличия хронологических последовательностей объемов стока р. Или и рек, впадающих в восточную часть озера, а также безвозвратного изъятия стока, связанного с хозяйственной деятельностью. В качестве аналога условий водности на предстоящий период может быть использован сток *n*-летних, сформированных либо из фактического гидрологического ряда, либо из моделируемого по одному из известных способов [7].

В [4] автором (совместно с А. Н. Жиркевичем) предложены соотношения, связывающие величину перетока с балансовыми и морфометрическими характеристиками озера в его западной и восточной частях:

$$\pm W_{nep} = k_2 W_3 - k_1 W_6 - k_1 k_2 F(h_3 - h_6) \quad (1)$$

где W_3 , W_6 – объем притока, км³, W_{nep} – объем перетока, км³, h_3 , h_6 – слой видимого испарения, м; F_3 , F_6 – средняя площадь водного зеркала при изменении уровня озера. Индексы «з» и «в» относятся, соответственно, к ЗБ и ВБ; знак плюс означает переток воды из ЗБ в ВБ, знак минус соответствует обратному направлению перетока.

Из формулы (1) можно получить величину притока (W_3) в ЗБ обеспечивающего балансовое равновесие между обеими частями озера (при $W_{nep} = 0$) или переток воды в заданном объеме (при $W_{nep} \neq 0$). При отсутствии перемычки в проливе Узун-Арал попуск из Капшагайского водохранилища W_{Kan} может быть определен по выражению:

$$W_{Kan} = W_\delta + W_{op} \quad (2)$$

где W_δ – приток к вершине дельты р. Или, W_{op} – безвозвратные отъемы стока р. Или на орошение ниже створа КГЭС.

Наиболее точный путь заключается в установлении попуска из Капшагайского водохранилища за данный интервал времени совместно с определением уровня оз. Балхаш. Объем попуска находится методом итераций до выполнения с точностью ϵ_1 условия:

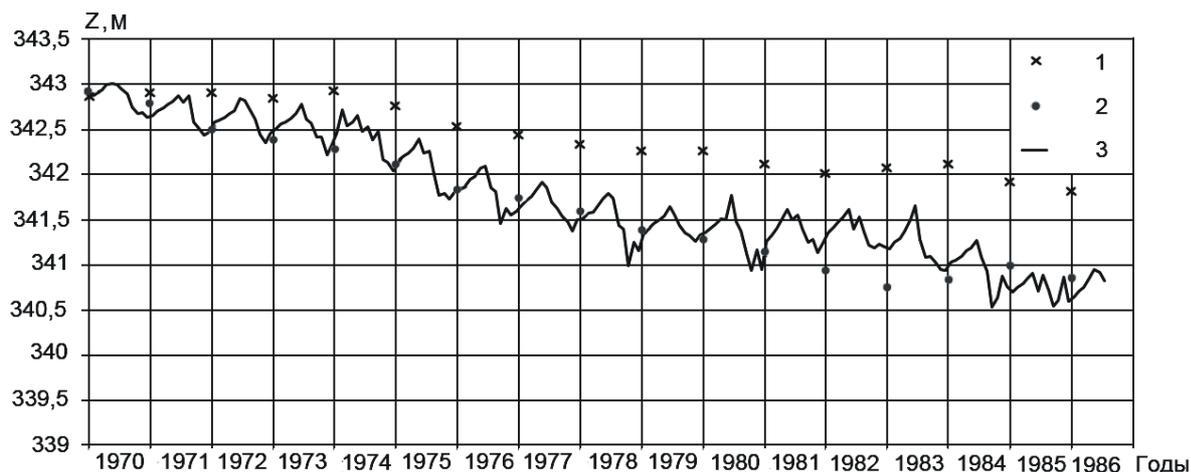


Рис. Ожидаемые и фактические уровни оз. Балхаш

- 1 – естественный режим
 2 – ожидаемые уровни (с развитием орошения и Капшагайским водохранилищем)
 3 – фактические уровни

$$\left| W_{Kan}^{(m)} - W_{Kan}^{(m-1)} \right| \leq e_1, \quad (3)$$

где m – порядковый номер итерации.

Предложенный нами подход был использован для оценки ожидаемого уровня оз. Балхаш при сценарии роста дополнительного безвозвратного изъятия воды орошение и испарение до объема в $2,1 \text{ км}^3$ в год (14% к норме стока) через 15 лет после начала заполнения Капшагайского водохранилища. В качестве модели естественного притока по р. Или и рекам ВБ принято n -летие 1930-58 гг.

Уровни озера z [для естественных условий (1), ожидаемые (2) и фактические (3)] с 1970 по 1986 г. представлены на рис. Его анализ показывает удовлетворительное совпадение ожидаемых уровней озера с фактическими вплоть до 1981 г. Сопоставление фактических и естественных уровней позволяет оценить степень нестационарности, привнесенной в режим озера отъемами воды на орошение и созданием Капшагайского водохранилища. Уже на уровне 1985 г. отклонение уровней озера от естественного стационарного режима составляло 1,0 м. В перспективе можно ожидать как временного снижения эффекта нестационарности в связи с изменением параметров Капшагайского водохранилища, так и его повышения из-за значительного возрастания безвозвратных объемов стока на хозяйственные нужды за пределами казахской части бассейна р. Или.

Наполнение самого Капшагайского водохранилища из-за резкого снижения уровня оз. Балхаш остановилось на отметках ниже проектного уров-

ня мертвого объема ($\sim 475 \div 475,5 \text{ м}$). В 2008 г. были установлены новые параметры Капшагайского водохранилища, отличающиеся от проектных: НПУ = 479 м (на 6 м ниже проектного) и полный объем $W_{пол} = 18,6 \text{ км}^3$ (на $9,5 \text{ км}^3$ меньше проектного). Уровень мертвого объема (УМО) определен на отметке 474,5 м (на 6,5 м ниже проектного) при величине мертвого объема $W_m = 13,0 \text{ км}^3$ (на $8,5 \text{ км}^3$ меньше проектного). Таким образом, полезная емкость водохранилища теперь составляет $W_n = 5,6 \text{ км}^3$ (85% от проектной).

На 25.09.2011 г. уровень оз. Балхаш составил 342,7 м, а Капшагайского водохранилища 478,58 м.

Использование искусственных последовательностей притока

В рассматриваемом случае возникает необходимость моделирования двух взаимозависимых последовательностей стока с автокорреляцией. Теоретическая основа решения такого рода задачи примечательно к стоковой модели Д. Я. Ратковича [7], разработана в [8]. Ее суть сводится к следующему.

Пусть x_i и y_i – искомые последовательности стока (x_i – сток р. Или, y_i – суммарный сток восточных рек). Их параметры: среднее \bar{x}_i , \bar{y}_i , коэффициенты вариации C_{vx} , C_{vy} , коэффициенты автокорреляции r_x , r_y и взаимной корреляции R_{xy} .

Для получения искомых последовательностей x и y используются вспомогательные гамма-распределенные взаимонезависимые последовательности обеспеченностей u , v и w (в интервале $0 \div 1$), моделируемые по схеме простой цепи Маркова.

Члены последовательностей x_i и y_i будут определяться по формулам:

$$x_i = u_i + w_i, \quad (4)$$

$$y_i = v_i + aw_i, \quad (5)$$

Характеристики основных и вспомогательных зависимостей находятся в соотношениях, указанных ниже.

Средние значения:

$$\bar{x} = \bar{u} + \bar{w}, \quad \bar{y} = \bar{v} + a\bar{w}; \quad (6)$$

дисперсии:

$$D(x) = D(u) + D(w), \quad D(y) = D(v) + a^2D(w); \quad (7)$$

коэффициенты автокорреляции:

$$r_x D(x) = r_u D(u) + r_w D(w), \quad (8)$$

$$r_y D(y) = r_v D(v) + a^2 r_w D(w).$$

Коэффициент взаимной корреляции определяется по выражению:

$$R_{xy} = \sqrt{D(x)D(y)} = aD(w). \quad (9)$$

В формулах (6-9): D – символ дисперсии, r_x, r_y, r_u, r_v, r_w – коэффициенты автокорреляции; коэффициент

$a = R_{xy} \frac{yC_{vy}}{xC_{vx}}$, где C_{vx}, C_{vy} – коэффициенты вариации исходных рядов x и y .

Учитывая соотношения (6-9), а также ограничения

$\bar{w} < \bar{x}$ и $\bar{w} = \sqrt{\frac{D(y)}{D(x)}} < \bar{y}$, получаем выражения для коэффициентов автокорреляции и вариации:

$$r_u = \frac{r_x}{1-r_{xy}}, \quad r_v = \frac{r_y}{1-r_{xy}}, \quad r_w = \frac{r_x - r_u(1-r_{xy})}{r_{xy}}, \quad (10)$$

$$C_{vu} = \sqrt{\frac{(1-r_{xy})D(x)}{\bar{x}-\bar{w}}}, \quad C_{vv} = \sqrt{\frac{(1-r_{xy})D(y)}{\bar{y}-\sqrt{\frac{D(y)}{D(x)}}\bar{w}}}, \quad (11)$$

$$C_{vw} = \frac{1}{w} \sqrt{r_{xy}D(x)}.$$

Далее задаемся диапазоном величин \bar{w} и строим зависимости C_{vu}, C_{vv}, C_{vw} от \bar{w} , на основе которых выбираем удобные для расчета значения коэффициента вариации вспомогательных зависимостей и соответствующую величину \bar{w} . Далее определяем $u = x - w$ и $v = y - aw$.

Следующий этап – поиск h (соотношений коэффициентов асимметрии и вариации). Для этой

цели используем следующие выражения, полученные из формул (6-11):

$$\frac{h_x}{x} = \frac{h_u}{x-w} (1-r_{xy})^2 + \frac{h_w}{w} r_{xy}^2, \quad (12)$$

$$\frac{h_y}{y} = \frac{h_v}{y-aw} (1-r_{xy})^2 + \frac{h_w}{aw} r_{xy}^2, \quad (13)$$

В системе уравнений (12) и (13) три неизвестных. Для решения уравнений закрепляем приемлемые соотношения коэффициентов асимметрии и вариации, которые находим по связи задаваемых величин \bar{w} с h_u и h_v .

Описанным способом применительно к Или-Балхашской системе были найдены параметры вспомогательных последовательностей:

а) $\bar{u} = 8,48 \text{ км}^3, \quad v = 0,49 \text{ км}^3, \quad \bar{w} = 6,48 \text{ км}^3$

б) $C_{vu} = 0,14, \quad C_{vv} = 1,2, \quad C_{vw} = 0,36$

в) $h_u = 1,0, \quad h_v = 4,0, \quad h_w = 1,3$

г) $z_u = 0,35, \quad z_v = 0, \quad z_w = 0,15.$

С использованием найденных параметров определен явный вид уравнений (4) и (5) в км³:

$$x_i = 9,9k_{ui} + 6,5k_{wi}, \quad y_i = k_{vi} + 2,7k_{wi}, \quad (14)$$

где k_{uv}, k_{wi}, k_{vi} – значения вспомогательных последовательностей в долях соответствующих средних. Указанные величины получены по координатам трехпараметрического распределения С. Н. Крицкого и М. Ф. Менкеля [6].

Апробация описанного подхода к моделированию притока в оз. Балхаш показала достаточно удовлетворительное совпадение заданных и получаемых параметров притока.

Оценка нестационарности элементов баланса оз. Балхаш в перспективе

Ввиду большой неопределенности с информацией по хронологии ирригационного водозабора в бассейне оз. Балхаш в перспективе представляет интерес для оценки возможной динамики основных элементов баланса и уровня озера рассмотрение диапазона вариантов с постоянным безвозвратным изъятием. Некоторые результаты исследований по указанному направлению приведены в таблице.

Пояснения к таблице: $W, W_3, W_6, \bar{a}_H, h_u, W_u, z_0, Dz_0, F_0, F_{oz}, F_{oe}, W_{nep}$, соответственно, суммарный приток в озеро, приток в ЗБ и ВБ, изъятие из притока, годовой слой видимого испарения (мм), видимое испарение (км³), уровень равновесия, из-

Показатели нестационарности режима Или-Балхашской системы ($h_{II} = 0,886$ м)

Условные обозначения	Характеристики озера и его частей при изъятиях \bar{a}_{II} , км ³					
	0	1	2	3	4	5
W , км ³	15,8	14,8	13,8	12,8	11,8	10,8
W_3 , км ³	12,3	11,5	10,5	9,5	8,5	7,5
W_6 , км ³	3,58	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3
W_u , км ³	15,8	14,8	13,8	12,8	11,8	10,8
F_0 , тыс. км ²	18,2	1,1	15,9	14,9	13,6	12,5
z_0 , м	342,0	341,4	340,9	340,5	339,6	338,8
Δz_0 , м	0	-0,6	-1,1	-1,6	-2,4	-3,2
F_3 , тыс. км ²	10,6	10,0	9,3	8,9	8,0	7,3
F_6 , тыс. км ²	7,6	7,1	6,6	6,2	5,6	5,1
$W_{пер}$, км ³	2,53	2,43	1,78	1,15	0,93	0,57
$W_{пер}$ (% от естеств.)	0	0,96	0,70	0,45	0,37	0,23

менение уровня равновесия относительно естественных условий, площадь зеркала при уровне равновесия (всего озера, западной и восточной части), объем перетока воды из ЗБ в ВБ.

Отметим, что изъятие из стока восточных рек \bar{a}_{II6} во всех вариантах принималось постоянным и равным $\bar{a}_{II6} = 0,2$ км³. Сток в восточную часть озера определялся по выражениям $W_6 = W'_6 + W_{не} - \bar{a}_{II6}$, где $W_{не}$ – подземный приток в ВБ (0,48 км³). Сток в западную часть озера находился как $W_3 = W - W_6$; объем перетока $W_{пер}$ устанавливался по формуле (1) при $(h_3 - h_6) = 0,186$ м.

По информации, содержащейся в таблице, можно сделать следующие выводы. Главные из них: по мере роста безвозвратного изъятия стока уровень равновесия снижается достаточно быстро и ощутимо: на высоких отметках (~до 341 м) 1 км³ в год дополнительного изъятия снижает уровень равновесия на 0,5-0,6 м, а на низких (340-339 м) на 0,8 м. Далее – величина перетока из ЗБ в ВБ, играющая основную роль в процессах формирования солевого режима озера, уменьшается вдвое уже при дополнительном изъятии 3,0 км³ в год, что создает в отдельные годы угрозу обратного перетока соленой воды из ВБ в ЗБ при ветровых переносах.

Подобная ситуация вполне реальна, поскольку основная стокообразующая часть бассейна

р. Или и наиболее крупные потребители воды находятся за пределами Казахстана.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Асарин А. Е. Уровенный режим Аральского моря при развитии водопотребления в бассейнах рек Сырдарьи и Амударьи / А. Е. Асарин // Тр. Гидропроекта. – 1964. – Сб. 12. – С. 211-221.
2. Голубцов В. В. Водный баланс оз. Балхаш и динамика его элементов в естественных условиях и при проведении в бассейне водохозяйственных мероприятий / В. В. Голубцов, А. Н. Жиркевич // Тр. КазНИГМИ. – 1973. – Вып. 50. – С. 153-177.
3. Искендеров Т. Вероятностный анализ многолетних колебаний уровня оз. Балхаш / Т. Искендеров // Тр. ГГИ. – Л. : Гидрометеиздат, 1969. – Вып. 162. – С. 171-187.
4. Красов В. Д. Прогноз режима Капшагайского водохранилища с учетом изменения водного баланса и уровня оз. Балхаш / В. Д. Красов // Тр. ГГИ. – 1974. – Вып. 220 : Проблема рационального использования водных ресурсов бассейна оз. Балхаш. – С. 17-32.
5. Красов В. Д. Расчет режима Или-Балхашской водной системы на перспективу / В. Д. Красов // Тр. IV гидрологического съезда. – Л. : Гидрометеиздат, 1975. – Т. 5: Гидрология озер, водохранилищ и устьев рек. – С. 87-97.
6. Крицкий С. Н. Гидрологические основы управления водохозяйственными системами / С. Н. Крицкий, М. Ф. Менкель. – М. : Наука, 1982. – 271 с.
7. Раткович Д. Я. Гидрологические основы водообеспечения / Д. Я. Раткович. – М. : ИВПАН, 1993. – 428 с.

8. Раткович Д. Я. Моделирование взаимозависимых гидрологических рядов (на примере притока к Аральскому и Азовскому морям) / Д. Я. Раткович // Водные ресурсы. – 1977. – № 1. – С. 38-47.

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

9. Чистяева С. П. К вопросу о практическом применении методики расчета распределения минерализации воды по акватории водоемов к озеру Балхаш / С. П. Чистяева // Тр. КазНИГМИ. – 1977. – Вып. 58. – С. 96-113.

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