

УДК 502/504:556.16

В. Г. ГУСЬКОВФедеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
«Московский государственный университет природообустройства»**ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
ВЗАИМОСВЯЗИ ОБЪЕМОВ СТОКА С ЧАСТНЫХ
ВОДОСБОРОВ ВОЛЖСКО-КАМСКОГО КАСКАДА
ВОДОХРАНИЛИЩ**

На примере Волжско-Камского каскада водохранилищ рассматривается возможность учета взаимосвязи объемов стока с частных водосборов речного бассейна в различные фазы водности года. Это позволяет более рационально управлять зарегулированным стоком Волги как при пропуске высоких половодий, так и при выдерживании гарантированных попусков в нижние бьефы гидроузлов в маловодные годы.

Гидрологический расчет, каскад водохранилищ, пропуск высоких половодий, маловодные годы, теплая межень, холодная межень.

On the example of the Volga-Kama cascade of water reservoirs there is considered a possibility of taking into account the interaction of drain volumes from private water pools of the river basin during different phases of the yearly water content. This will allow managing the regulated Volga flow more rationally at both high water flows and maintaining the guaranteed drafts into lower ponds of hydraulic works during shallow years.

Hydrological estimation, cascade of water reservoirs, draft of high waters, shallow years, warm mean water, cold mean water.

В связи с развитием производства на крупных речных бассейнах, подобных Волжско-Камскому, в настоящее время и в ближайшем будущем будет нарастать дефицит водных ресурсов, что неизбежно вызовет необходимость корректировки диспетчерских графиков водохранилищ каскада с учетом боковой приточности к каждому из них в различные фазы водности. При этом расчет водохозяйственных балансов для оперативного управления водохранилищами каскада предполагает наличие предварительного прогноза объемов стока (боковой приточности) с их частных водосборов с учетом его асинхронности.

Основная цель работы – исследование пространственно-временных закономерностей естественного стока с частных водосборов современных крупных каскадов водохранилищ, подобных Волжско-Камскому, совершенствование методики прогноза естественного стока

с частных водосборов водохранилищ во времени (в различные фазы водности) и пространстве (от истока до устья).

Для реализации поставленной цели потребовалось решение комплекса взаимосвязанных задач:

изучить природные, климатические, гидрологические характеристики частных водосборов Волжско-Камского каскада и обосновать их укрупнение при исследовании;

оценить пространственно-временные характеристики естественного стока Волги с укрупненных частных водосборов Волжско-Камского каскада;

исследовать эффект асинхронности стока с частных водосборов водохранилищ Волжско-Камского каскада во времени (в различные фазы водности года) и в пространстве;

усовершенствовать методику прогнозирования стока с частных водосборов водохранилищ во времени (в различные фазы водности года) и в пространстве с учетом эффекта

асинхронности стока.

В работе были использованы следующие методы исследования: генетический анализ; статистический анализ временных рядов; прогностический анализ (метод асинхронности Сомова, метод регрессии).

Исходными данными явились среднемесячные значения стока (естественного бокового притока) с частных водосборов 11 водохранилищ Волжско-Камского каскада, а именно: Иваньковского, Угличского, Рыбинского, Нижегородского, Чебоксарского, Камского, Воткинского, Нижнекамского, Самарского, Саратовского и Волгоградского за 1914/15–2002/03 годы (89 лет).

Для большей наглядности метода расчет проводили по укрупненным частным водосборам Волжско-Камского каскада водохранилищ:

Верхняя Волга – от истока Волги до створа Чебоксарского гидроузла (частные водосборы Иваньковского, Угличского, Рыбинского, Нижегородского и Чебоксарского водохранилищ);

Кама – от истока Камы до створа Нижнекамского гидроузла (частные водосборы Камского, Воткинского и Нижнекамского водохранилищ);

Средняя Волга – от створов Чебоксарского и Нижнекамского гидроузлов до створа Волгоградского гидроузла (частные водосборы Самарского, Саратовского и Волгоградского водохранилищ).

Предварительный анализ показал, что годовой сток, равно как и сток в половодье, межень (в целом), теплую и холодную межень, распределяется так: Верхняя Волга – около 45 %; Кама – 35 %; Средняя Волга – 20 %.

Анализ хронологических рядов естественного стока Волги за период 1914/15–2002/03 годов показал, что колебания боковой приточности по выделенным укрупненным частным водосборам (Верхняя Волга, Кама, Средняя Волга) в различные фазы водности идут в основном в синхронном режиме. Однако в отдельные годы наблюдается их ярко выраженная асинхронность, например:

годовой сток –

1955 год – Верхняя Волга асинхронна Каме и Средней Волге;

половодье –

1953, 1965 годы – Верхняя Волга асинхронна Каме и Средней Волге;

2002 год – Кама асинхронна Верхней и Средней Волге;

теплая межень –

1930 год – Кама асинхронна Верхней и Средней Волге;

1937, 1955 годы – Верхняя Волга асинхронна Каме и Средней Волге;

холодная межень –

1918, 2004 годы – Кама асинхронна Верхней и Средней Волге;

1935, 1955 годы – Верхняя Волга асинхронна Каме и Средней Волге.

Изначальным количественным показателем асинхронности стока является коэффициент корреляции между объемами стока в различные (исследуемые) фазы водности многолетнего ряда наблюдений. При этом с увеличением значения коэффициента корреляции (при $R \rightarrow \pm 1$) эффект асинхронности стока падает, а с уменьшением его значения (при $R \rightarrow 0$) эффект асинхронности стока становится более выраженным.

Проведенный предварительный анализ временных рядов стока (естественного бокового притока) с укрупненных частных водосборов показал, что коэффициенты корреляции между объемами стока с этих участков в различные фазы водности колеблются в широких пределах:

$R = 0,47 \dots 0,71$ – годовой сток;

$R = 0,39 \dots 0,68$ – половодье;

$R = 0,41 \dots 0,65$ – теплая межень;

$R = 0,51 \dots 0,79$ – холодная межень.

Эффект асинхронности неоднозначен, его количественная оценка приближена и сложна. Одним из наиболее простых и надежных методов определения эффекта асинхронности является метод, разработанный Н. В. Сомовым [1, 2]. В дальнейшем этот метод получил развитие в трудах А. А. Волчека, В. В. Лукши и Ан. А. Волчека и

был ими реализован при оценке асинхронности стока рек Белоруссии [3].

В основу предложенной методики положено определение эффекта асинхронности по совмещенным кривым обеспеченности суммарных хронологического и равнообеспеченного рядов значений гидрометеорологической величины (например, объемов стока).

При построении кривой обеспеченности суммарного хронологического ряда суммирование модульных коэффициентов гидрометеозлемента проводится за одноименные годы в хронологическом порядке, затем выполняется ранжирование ряда в убывающем порядке.

При построении кривой обеспеченности суммарного равнообеспеченного ряда гидрометеозлемента располагают в убывающем порядке и суммируют, затем, в зависимости от места, занимаемого каждым членом такого суммарного убывающего ряда, ему присваивается соответствующая обеспеченность.

В качестве количественного показателя степени асинхронности гидрометеозлементов используется соотношение:

$$A(P) = \frac{\sum_{j=1}^n K_j xp(P)}{\sum_{j=1}^n K_j po(P)}, \quad (1)$$

где $\sum_{j=1}^n K_j xp(P)$ – сумма хронологических модульных коэффициентов; $\sum_{j=1}^n K_j po(P)$ – сумма равнообеспеченных ранжированных модульных коэффициентов; n – число постов наблюдений (лет наблюдений).

В нашем случае соотношение (1) принимает следующий вид:

$$A(P) = \frac{[K_{пол,в.волга}(T) + K_{пол,кама}(T)](P)}{K_{пол,в.волга}(P) + K_{пол,кама}(P)}, \quad (2)$$

где $K_{пол,в.волга}(T)$ и $K_{пол,кама}(T)$ – значения модульных коэффициентов объемов естественного стока половодья календарного ряда на Верхней Волге и Каме соответственно; $[K_{пол,в.волга}(T) + K_{пол,кама}(T)](P)$ – ранжированные суммарные (за одноименные годы) значения модульных коэффициентов объемов естественного стока половодья на Верхней Волге и Каме; $K_{пол,в.волга}(P)$ и $K_{пол,кама}(P)$ – ранжированные (равнообеспеченные) значения модульных коэффициентов объемов естественного стока половодья на Верхней Волге и Каме.

Расчет ведется с помощью уравнения асинхронности стока (на примере естественного стока половодья на Каме и Верхней Волге):

$$W_{пол,кама}(T) = W_{пол,кама}(P) \cdot A(P) + W_{пол,в.волга}(P) \frac{W_{о,пол,кама}}{W_{о,пол,в.волга}} [A(P) - 1], \quad (3)$$

где $W_{пол,в.волга}(P)$ и $W_{пол,кама}(P)$ – объемы естественного стока половодья Верхней Волги и Камы равной обеспеченности в предварительно ранжированных соответствующих рядах стока за указанные периоды водности; $W_{о,пол,в.волга}$ и $W_{о,пол,кама}$ – среднееголетние значения объемов естественного стока половодья на Верхней Волге и Каме соответственно; $A(P)$ – коэффициент асинхронности объемов естественного стока половодья на Верхней Волге и Каме.

Полученные результаты сопоставлялись также с результатами расчета по известному уравнению регрессии:

$$W_{пол,кама}(T) = W_{о,пол,кама} + R \frac{\sigma_{пол,кама}}{\sigma_{пол,в.волга}} \times (W_{пол,в.волга}(T) - W_{о,пол,в.волга}), \quad (4)$$

где $W_{пол,в.волга}(T)$ и $W_{пол,кама}(T)$ – объемы естественного стока в половодье текущего года на Верхней Волге и Каме; $W_{о,пол,в.волга}$ и $W_{о,пол,кама}$ – среднееголетние значения объемов естественного стока в половодье; $\sigma_{пол,в.волга}$, $\sigma_{пол,кама}$ – среднеквадратические отклонения; R – коэффициент корреляции между значениями объемов естественного стока в половодье на Верхней Волге и Каме.

Используя поэтапно формулу асинхронности стока (3), автор сделал прогноз объемов стока с укрупненных частных водосборов Камы и Средней Волги в период половодья, исходя из данных об объеме стока в половодье на Верхней Волге. Коэффициент корреляции между значениями объемов стока в период половодья составлял: на Верхней Волге и Каме $R_{в.волга/кама} = 0,39$; на Верхней и Средней Волге – $R_{в.волга/с.волга} = 0,62$; на Каме и Средней Волге – $R_{кама/с.волга} = 0,68$. Результаты расчета приведены в табл. 1 и 2.

Анализ результатов расчета показал, что в расчетном средневодном 1995/96 году на Верхней Волге с обеспеченностью стока в половодье $P = 50\%$ ошибка предсказания стока в половодье на Каме по уравнению асинхронности составила $\varepsilon = 3,74\%$, а по уравнению регрессии $\varepsilon = 4,89\%$, что не превысило допустимых значений (см. табл. 1).

Таблица 1

**Сопоставление вариантов прогнозируемых и фактических объемов
естественного стока в половодье с частных водосборов
Волжско-Камского каскада (ВКК) водохранилищ**

Годы	Половодье. Период IV–VI											
	Верхняя Волга		Кама									
	Фактически		Прогноз по методу асинхронности				Прогноз по методу регрессии				Фактически	
	км ³	P, %	A	км ³	ε, %	R	км ³	ε, %	км ³	P, %		
1917/18	94,00	10,0	0,939	66,57	11,66	0,39	64,41	8,03	59,62	38,89		
1995/96	69,75	50,0	0,960	52,57	3,74	0,39	57,28	4,89	54,61	55,56		
1939/40	49,53	90,0	1,044	42,15	18,11	0,39	51,32	0,29	51,47	62,22		

Таблица 2

**Сопоставление прогнозируемых и фактических объемов
естественного стока в половодье с частных водосборов
Волжско-Камского каскада (ВКК) водохранилищ**

Годы	Половодье. Период: IV–VI											
	Фактически		Прогноз по методу асинхронности						Фактически			
	Верхняя Волга		Кама		Средняя Волга		ВКК		Верхняя Волга		ВКК	
	км ³	P, %	км ³	ε, %	км ³	ε, %	км ³	ε, %	км ³	км ³	км ³	км ³
1917/18	94,0	10,0	66,6	11,7	45,6	11,3	206,1	6,0	94,0	59,6	40,9	194,5
1995/96	69,7	50,0	52,6	3,7	35,4	21,1	157,7	6,8	69,7	54,6	44,9	169,2
1939/40	49,5	90,0	42,2	18,1	20,5	15,2	112,2	10,4	49,5	51,5	24,2	125,2

В расчетном многоводном 1917/18 году на Верхней Волге с обеспеченностью стока в половодье $P = 10\%$ ошибка предсказания стока ϵ на Каме обоими методами также находилась в допустимых пределах и составляла $11,7\%$ по методу асинхронности и 8% по уравнению регрессии.

В расчетном маловодном 1939/40 году на Верхней Волге с обеспеченностью стока в половодье $P = 90\%$ ошибка предсказания стока ϵ на Каме составила $18,1\%$ по методу асинхронности и $0,3\%$ по уравнению регрессии.

Что касается Средней Волги, то ошибки прогноза стока в половодье составили соответственно: $\epsilon = 11,3\%$ ($P = 10\%$), $\epsilon = 21,1\%$ ($P = 50\%$), $\epsilon = 15,2\%$ ($P = 90\%$) (см. табл. 2).

Полученные результаты расчета показали, что в 1917/18 году с обеспеченностью стока на Верхней Волге в половодье $P = 10\%$ ошибка предсказания ϵ стока в половодье как на Каме, так и на Средней Волге не превысила допустимого значения. В расчетном 1995/

96 году с обеспеченностью стока на Верхней Волге в половодье $P = 50\%$ ошибка предсказания ϵ стока в половодье превысила допустимое значение на Средней Волге, а в расчетном 1939/40 году с обеспеченностью стока на Верхней Волге в половодье $P = 90\%$ ошибка предсказания ϵ стока в половодье превысила допустимое значение на Каме. В целом же по Волжско-Камскому каскаду водохранилищ во все указанные расчетные годы ошибка предсказания ϵ стока в половодье допустимого значения не превысила.

Аналогичные расчеты прогноза стока Волги были произведены как для годового стока в целом, так и для стока в теплую и холодную межень (табл. 3).

Полученные результаты расчета показали, что в расчетном 1953/54 году с обеспеченностью стока на Верхней Волге $P = 10\%$ ошибка предсказания ϵ годового стока на Каме и на Средней Волге превысила допустимое значение (см. табл. 3). В расчетном 1992/93 году с обеспеченностью годового стока на Верхней Волге $P = 50\%$ ошибка

Сопоставление прогнозируемых и фактических объемов естественного годового стока с частных водосборов Волжско-Камского каскада (ВКК) водохранилищ

Годы	Период: IV–III											
	Фактически		Прогноз по методу асинхронности						Фактически			
	Верхняя Волга		Кама		Средняя Волга		ВКК		Верхняя Волга	Кама	Средняя Волга	ВКК
	км ³	<i>P</i> , %	км ³	ϵ , %	км ³	ϵ , %	км ³	ϵ , %	км ³	км ³	км ³	км ³
1953/54	145,1	10,0	112,5	76,9	64,9	21,3	322,5	24,2	145,1	68,5	46,0	259,6
1992/93	108,8	50,0	98,5	13,6	52,2	3,4	259,5	3,7	108,8	96,2	64,4	269,4
1964/65	77,4	90,0	79,3	18,1	30,1	0,7	186,8	16,9	77,4	95,5	52,0	225,0

предсказания ϵ годового стока не превысила допустимого значения на Средней Волге, а в расчетном 1964/65 году с обеспеченностью стока на Верхней Волге в половодье $P = 90\%$ ошибка предсказания ϵ годового стока незначительно превысила допустимое значение на Каме. В целом же по Волжско-Камскому каскаду водохранилищ в многоводные годы ошибка предсказания ϵ годового

стока превысила допустимые значения, а в средневодные и маловодные годы не превысила.

Полученные результаты расчета показали, что во все расчетные годы ошибка предсказания ϵ стока в теплую межень как на Каме, так и на Средней Волге не превысила допустимого значения (табл. 4). В целом же по Волжско-Камскому каскаду водохранилищ в мно-

Таблица 4

Сопоставление прогнозируемых и фактических объемов естественного стока в теплую межень с частных водосборов Волжско-Камского каскада (ВКК) водохранилищ

Годы	Теплая межень. Период: VII–XI											
	Фактически		Прогноз по методу асинхронности						Фактически			
	Верхняя Волга		Кама		Средняя Волга		ВКК		Верхняя Волга	Кама	Средняя Волга	ВКК
	км ³	<i>P</i> , %	км ³	ϵ , %	км ³	ϵ , %	км ³	ϵ , %	км ³	км ³	км ³	км ³
1935/36	39,8	10,0	34,1	85,9	15,0	86,3	88,9	21,5	39,8	24,0	9,4	73,2
1968/69	23,0	50,0	24,2	13,0	10,2	20,7	57,4	1,1	23,0	22,3	11,5	56,8
1951/52	14,7	90,0	15,7	142,7	6,2	129,0	36,6	7,1	14,7	14,8	4,7	34,2

годоводные годы ошибка предсказания ϵ стока в теплую межень превысила допустимые значения, а в средневодные и маловодные годы не превысила.

Полученные результаты расчета показали, что в расчетном 1977/78 году с обеспеченностью стока на Верхней Волге $P = 10\%$ ошибка предсказания ϵ стока в холодную межень на Каме превысила допустимое значение, а на Средней Волге не превысила (табл. 5). В расчетном 1984/85 году с обеспеченностью стока в холодную межень на Верхней Волге $P = 50\%$ ошибка пред-

сказания ϵ годового стока на Каме и на Средней Волге превысила допустимое значение, а в расчетном 1941/42 году с обеспеченностью стока на Верхней Волге в половодье $P = 90\%$ ошибка предсказания ϵ стока в холодную межень на Каме и на Средней Волге не превысила допустимого значения. В целом же по Волжско-Камскому каскаду водохранилищ как в многоводные, так и в маловодные годы ошибка предсказания ϵ годового стока не превысила допустимых значений, а в средневодные годы превысила незначительно.

Сопоставление прогнозируемых и фактических объемов естественного стока в холодную межень с частных водосборов Волжско-Камского каскада (ВКК) водохранилищ

Годы	Холодная межень. Период: XII–III															
	Фактически		Прогноз по методу асинхронности						Фактически							
	Верхняя Волга		Кама		Средняя Волга		ВКК		Верхняя Волга		Кама		Средняя Волга		ВКК	
	км ³	P, %	км ³	ε, %	км ³	ε, %	км ³	ε, %	км ³	км ³	км ³	км ³	км ³	км ³		
1977/78	24,9	10,0	17,1	39,2	9,3	15,8	51,3	6,4	24,9	12,3	11,0	48,2				
1984/85	16,9	50,0	10,8	35,8	6,2	21,1	33,9	18,5	16,9	16,9	7,8	41,6				
1941/42	9,9	90,0	8,4	15,8	3,7	4,9	21,9	7,4	9,9	9,9	3,9	23,7				

Выводы

Исследование показало, что на Волжско-Камском каскаде водохранилищ имеет место эффект асинхронности стока Волги с частных водосборов как во времени (в различные фазы водности года), так и в пространстве.

Предлагаемая методика прогнозирования объемов стока с частных водосборов водохранилищ каскада может быть использована с заранее заданными ограничениями. Применительно к прогнозу стока Волги с частных водосборов ВКК водохранилищ наиболее удачные прогнозы могут быть получены при наличии существенной корреляционной связи между значениями объемов стока в различные фазы водности на этих частных водосборах. При этом в средневодные годы лучшие результаты дает метод асинхронности для всех фаз водности, а в многоводные и маловодные годы (кроме холодной межени) лучше срабатывает метод регрессии. И только в маловодные годы холодной межени лучшие результаты прогноза дает метод асинхронности.

При составлении прогнозов необходимо учитывать следующее:

прогноз годового стока на Каме и Средней Волге в многоводные годы несколько превышает фактические значения, а в средневодные и маловодные годы занижает их;

прогноз стока в половодье в многоводные годы также несколько превышает фактические значения, а в средневодные и маловодные годы занижает их;

прогноз стока в теплую межень как в многоводные, так в средневодные и маловодные годы несколько превышает фактические значения или равен им;

прогноз стока в холодную межень в многоводные годы несколько превышает фактические значения, а в средневодные и маловодные годы занижает их.

1. **Сомов Н. В.** Асинхронность и цикличность колебаний стока рек СССР // Тр. ЦИП. – 1963. – Вып. 117. – С. 180–214.

2. **Сомов Н. В.** Асинхронность колебаний стока крупных рек СССР // Метеорология и гидрология. – 1963. – № 5. – С. 14–21.

3. **Волчек А. А., Лукша В. В., Волчек Ан. А., Грядунова О. И.** Оценка асинхронности в формировании максимальных и минимальных расходов воды рек Беларуси // География в XXI веке: проблемы и перспективы: материалы Международной научной конференции. – Минск: Квадрограф, 2004. – С. 15–16.

Материал поступил в редакцию 20.04.10.

Гуськов Виталий Геннадьевич, старший преподаватель кафедры «Гидрология, метеорология и регулирование стока»

Тел. 8 (495) 976-17-45

8 (499) 747-57-04

E-mail: vitold.gus@mail.ru