

УДК 502/504:556.55

Г. Х. ИСМАЙЛОВ, Н. В. МУРАЩЕНКОВА

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования
«Московский государственный университет природообустройства»

ОЦЕНКА ИЗМЕНЧИВОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ ВОДНОГО БАЛАНСА ПОЛОВОДЬЯ И МЕЖЕНИ БАСЕЙНА РЕКИ ВОЛГИ*

Приведены результаты анализа и оценки изменчивости элементов водного баланса за периоды весеннего половодья и межени по 11 частным водосборам и в целом по бассейну Волги. В бассейне реки Волги выделены четыре водохозяйственных района по условиям стационарности основных статистических параметров элементов водного баланса, а также по их внутрирядной и межрядной связи. Рассматривается динамика изменчивости элементов водного баланса Волги в пространстве и во времени. Получены уравнения связи, определяющие значения речного стока за периоды половодья и межени.

Элементы водного баланса, бассейн реки Волги, межгодовая изменчивость, половодье, межень, климат, автокорреляционная функция.

Results of the analysis and estimation of variability of elements of water balance for the periods of a spring high water and low water on 11 private reservoirs and as a whole on a river basin of Volga are resulted. In a river basin of Volga four water-economic areas on conditions of uniformity of the basic statistical parameters of elements of water balance, and also their communications inside of some and between numbers are allocated. Dynamics of variability of elements of water balance of the river of Volga in space and in time is considered. The equations of communication defining values of a river drain for the periods of a high water and low water from climatic factors defining them are received.

Elements of water balance, river basin of Volga, variability between several years, high water, low water, a climate, autocorrelation function.

Формирование элементов водного баланса (ЭВБ) в бассейнах крупных и малых рек в естественных условиях происходит во взаимодействии климатических и остальных физико-географических (ландшафтных) факторов. Климатическая зональность в общем случае определяет тип водного режима территории речного бассейна, но изменение режима в многолетнем разрезе, по генетическим фазам, по условиям формирования и амплитуде колебаний ЭВБ зависит во многом от внутризональной дифференциации, обусловленной азональными факторами и ландшафтной структурой бассейна. Речной бассейн

рассматривается как совокупность различных естественных и антропогенно-измененных ландшафтов, каждый из которых вносит свой качественный и количественный вклад в формирование элементов водного баланса. При различных режимах увлажнения и антропогенных нагрузок на ландшафт происходит перестройка структуры водного баланса территории. В свою очередь, закономерное сочетание ландшафтных комплексов определяет общий характер влагооборота в бассейне.

Пространственную изменчивость ЭВБ можно рассматривать в разных аспектах: как изменчивость отдельных характеристик элементов водного баланса (их статистических параметров, годовых, сезонных, месячных значений и тд.) по территории

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 12-05-00193а).

бассейна; как изменчивость тех же характеристик в зависимости от локальных особенностей климата, от отдельных элементов ландшафта, от степени антропогенных нагрузок в различных частях бассейна. Количественные характеристики изменчивости ЭВБ за многолетний период рассмотрены авторами статьи в двух аспектах: интегральные, отражающие суммарную изменчивость временных рядов ЭВБ, и динамические, отражающие колебания ЭВБ за конкретный отрезок времени.

Различное сочетание климатических и неклиматических факторов, включая и антропогенные, и определяет многообразие реакции речных водосборов на одни и те же осадки. Поэтому при рассмотрении пространственной изменчивости элементов водного баланса в первую очередь выделяются районы, однородные по структуре водного баланса (ВБ) и многолетней динамике его элементов. Формальной основой такого районирования может служить матрица взаимной корреляции временных рядов ЭВБ частных водосборов, принятых к рассмотрению.

Для выделенных районов, однородных по структуре водного баланса и динамике его элементов, осуществляется поиск наиболее значимых зависимостей характеристик элементов водного баланса от определяющих их природно-хозяйственных факторов. Параметры этих зависимостей отражают специфику природно-хозяйственных условий отдельных регионов и, в свою очередь, могут быть поставлены в зависимость от тех или иных интегральных факторов, отражающих данную специфику. Это открывает возможность оценки изменения параметров районных зависимо-

стей элементов водного баланса от определяющих их факторов для различных сценариев возможных изменений таких факторов в будущем и, как следствие, изменения собственно элементов водного баланса частных водосборов и бассейна в целом.

Для выявления пространственно-временных закономерностей изменения ЭВБ речных бассейнов авторами получены временные ряды за период с 1914/1915 по 2000/2001 годы ($N = 87$ лет) основных элементов водного баланса (речной сток, атмосферные осадки, суммарное испарение и бассейновые влагозапасы) по 11 частным водосборам бассейна реки Волги за период половодья, межени и года в целом [1, 2]. Наличие столь длительных временных рядов позволило осуществить оценку изменения основных характеристик ЭВБ бассейна реки Волги как в пространстве, так и во времени. Дополнительно к традиционно рассматриваемым элементам водного баланса были определены также разности «осадки – сток», «осадки – испарение». Кроме того, для оценки изменчивости гидротермического режима территории бассейна реки Волги авторы рассмотрели также изменение температуры воздуха в указанных 11 частных водосборах бассейна реки Волги, включая бассейн в целом.

Для всех рассматриваемых временных рядов были определены выборочные оценки основных статистических параметров (среднее значение, стандарт, коэффициент вариации, внутрирядные и межрядные связи), а также распределения вероятностей (вероятность превышения) характерных величин ЭВБ для отдельных частных водосборов в бассейне реки Волги и в целом для бассейна (табл.1).

Таблица 1

Выборочные оценки основных статистических параметров временных рядов годовых и сезонных величин ЭВБ зоны формирования стока в бассейне реки Волги за 1914/1915 – 2000/2001 годы ($N = 87$ лет), мм

Статистический параметр	Весеннее половодье (IV – VI)				Межень (VII – III)				Год (IV – III)			
	PВ	RB	EB	±VB	PM	RM	EM	±VM	PG	RG	EG	±VG
Среднее значение	329	87	141	-101	341	56	388	0	670	143	529	0
Минимальное значение	218	51	-22	-233	217	29	218	-351	481	85	312	-351
Максимальное значение	464	134	226	13	481	107	517	150	924	216	665	150
Амплитуда	246	83	248	246	264	78	299	501	443	131	353	501
Стандарт	47	18	43	50	58	16	61	87	84	28	71	87
Коэффициент вариации C_v	0,14	0,21	0,31	-0,49	0,17	0,28	0,16	-	0,13	0,20	0,13	-
Коэффициент асимметрии C_s	0,29	0,42	0,61	-0,98	0,34	0,57	0,31	-	0,26	0,40	0,26	-
$r[1]$	-0,08	0,18	0,18	0,17	0,08	0,44	0,36	0,48	0,11	0,51	0,53	0,48

Анализ временных рядов ЭВБ позволил разделить всю территорию бассейна реки Волги на четыре района по условиям стационарности основных статистических параметров элементов водного баланса, а также по их внутрирядной и межрядной связи. По изменчивости структуры и динамике элементов водного баланса территория бассейна Волги разделена на четыре водохозяйственных района: Верхняя Волга (частные водосборы Ивановского, Углического, Рыбинского и Нижегородского водохранилищ), Средняя Волга (частные водосборы Чебоксарского и Куйбышевского водохранилищ), река Кама (частные водосборы Камского, Воткинского и Нижнекамского водохранилищ) и Нижняя Волга (частные водосборы Саратовского и Волгоградского водохранилищ). По климатическим условиям обширную территорию бассейна реки Волги климатологи разделяют на три зоны: Верхнюю Волгу, Среднее Поволжье и Нижнее Поволжье [3]. Для временных рядов выделенных водохозяйственных районов определены выборочные оценки основных статистических параметров (табл. 2).

В период половодья среднемноголетние значения осадков колеблются от 261 мм (354 км³) – для водосбора Волгоградского водохранилища до 344 мм (468 км³) – для водосбора Камского водохранилища. Характерной особенностью распределения осадков по территории является то, что наибольшие значения приходятся на районы Верхней и Средней Волги и район Камы, а наименьшие значения – на район Нижней Волги – 261...270 мм (355...367 км³). Аналогичная тенденция свойственна и для меженного периода. Наиболее высокие значения осадков относятся к районам Верхней и Средней Волги и району Камы – 336...383 мм (457...521 км³), а наименьшие значения осадков относятся к району Нижней Волги – 222...249 мм (302...339 км³). По степени валовой увлажненности территорию бассейна реки Волги можно разделить на три зоны: избыточного увлажнения – районы Верхней Волги и Камы, достаточного увлажнения – район Средней Волги и недостаточного увлажнения – район Нижней Волги.

Прежде чем характеризовать изменение речного стока за период половодья и межени, отметим, что для бассейна реки Волги характерно преимущественно

Таблица 2

Выборочные оценки основных статистических параметров временных рядов годовых и сезонных величин ЭВБ водохозяйственных районов бассейна реки Волги за 1914/1915 – 2000/2001 годы (N = 87 лет), мм

Водохозяйственный район реки Камы

Статистический параметр	Весеннее половодье (IV – VI)						Межень (VII – III)						Год (IV – III)					
	PB	RB	EB	±VB	P-E	P-R	PM	RM	EM	±VM	P-E	P-R	PT	RT	ET	±VT	P-E	P-R
Среднее значение	334	153	87	-93	246	180	453	100	354	-	100	353	693	253	440	-	253	440
Коэффициент вариации C _v	0,17	0,23	0,17	-0,52	0,27	0,27	0,21	0,31	0,14	-	0,86	0,23	0,15	0,22	0,12	-	0,42	0,18
т1]	0,02	0,21	0,26	-0,03	0,06	-0,03	0,12	0,42	0,03	0,31	0,38	0,0	0,22	0,50	0,11	0,31	0,48	-0,05

Водохозяйственный район Нижней Волги

Статистический параметр	Весеннее половодье (IV – VI)						Межень (VII – III)						Год (IV – III)					
	PB	RB	EB	±VB	P-E	P-R	PM	RM	EM	±VM	P-E	P-R	PT	RT	ET	±VT	P-E	P-R
Среднее значение	266	48	113	-104	153	217	344	20	323	-	20	323	502	68	434	-	68	434
Коэффициент вариации C _v	0,24	0,50	0,60	-0,76	0,64	0,28	0,30	0,57	0,24	-	5,59	0,31	0,18	0,46	0,25	-	-2,06	0,20
т1]	-0,01	0,36	0,34	0,10	0,17	0,03	0,22	0,58	0,11	0,24	0,27	0,19	0,07	0,44	0,14	0,24	0,29	0,0

снеговое питание с высоким половодьем и низкой зимней меженью. В летне-осенний период нередки дождевые паводки, что обуславливает большую водность рек по сравнению с зимним сезоном.

Анализ изменения среднемноголетнего стока за период половодья по частным водосборам бассейна реки Волги показал следующее: для района Верхней Волги среднемноголетнее значение стока колеблется от 110 до 149 мм (от 150 до 203 км³), для района Средней Волги – от 46 до 79 мм (от 62 до 107 км³), для района Камы – от 121 до 191 мм (от 164 до 260 км³) и для района Нижней Волги – от 33 до 62 мм (от 45 до 84 км³). Аналогичная картина характерна и для периода межени. Так, например, для района Камы среднемноголетний сток за период межени составляет от 75 до 130 мм (от 102 до 177 км³), а для района Нижней Волги – от 10 до 29 мм (от 14 до 39 км³).

В районах Верхней и Средней Волги, реки Камы сток за период половодья хорошо коррелирует с атмосферными осадками, выпадающими на водосборе за зимний и весенний периоды. Коэффициент корреляции изменяется от 0,45 до 0,60, чего нельзя сказать про район Нижней Волги ($r = 0,18...0,27$). Анализ связи между стоком и эффективными осадками (разность «осадки – испарение») показал, что существует более тесная связь в годовом и сезонном разрезе. Для весеннего половодья эта связь изменяется от 0,45 (для частного водосбора Воткинского водохранилища) до 0,99 (для частного водосбора Куйбышевского водохранилища), а для межени – от 0,61 до 0,99 (для тех же частных водосборов). Это свидетельствует о том, что для оценки величин речного стока можно выбрать прежде всего «эффективные осадки», а также собственно атмосферные осадки и суммарное испарение.

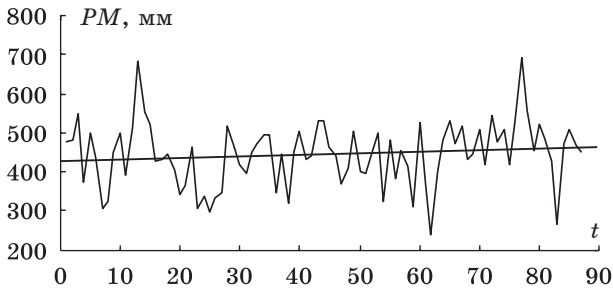
В отношении изменения испарения по территории обнаруживается несколько иная ситуация. Так, например, в период половодья, если для зоны избыточного увлажнения испарение изменяется от 65 до 123 мм (от 88 до 167 км³), то для зоны достаточного увлажнения – от 153 до 191 мм (от 208 до 260 км³), для зоны недостаточного увлажнения – от 109 до 132 мм (от 148 до 180 км³). Периоду межени свойственна достаточно высокая степень испарения для всех частных водосборов,

и она изменяется от 325 до 441 мм (соответственно от 442 и до 600 км³).

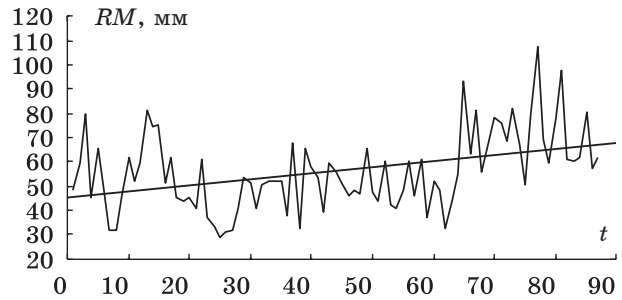
Изменению бассейновых влагозапасов свойственна следующая закономерность. В период половодья они имеют накопительное свойство, а в период межени происходит сработка, и в результате годовой баланс стремится к нулю. Для района Верхней Волги в период половодья накопление бассейновых влагозапасов изменяется от 88 до 105 мм (от 120 до 143 км³), для района Средней Волги – от 96 до 97 мм (от 130 до 132 км³), для района Камы – от 101 до 106 мм (от 137 до 144 км³), для района Нижней Волги – от 102 до 106 мм (от 139 до 144 км³). Таким образом, бассейновые влагозапасы, накопленные в период половодья, участвуют в формировании дополнительного испарения и поверхностного стока в период межени, благодаря чему повышается степень водообеспеченности территории частного водосбора речного бассейна в период межени.

Анализ тенденции изменения ЭВБ показывает, что для района Верхней Волги в период межени характерно увеличение речного стока за исследуемый период (1914/1915) на 14 мм за 87 лет. В то же время элементам водного баланса – атмосферным осадкам и испарению свойственно умеренное снижение. За рассматриваемый период осадки уменьшаются на 18 мм за 87 лет, а испарение – на 15 мм за тот же период. Бассейновые влагозапасы, которые участвуют в компенсации как речного стока, так и испарения, увеличиваются на 17 мм за 87 лет. К сожалению, исследование изменения ЭВБ за период половодья показало незначительное изменение этих элементов, особенно малозаметное изменение свойственно речному стоку (3 мм/87 лет) и испарению (5 мм/87 лет).

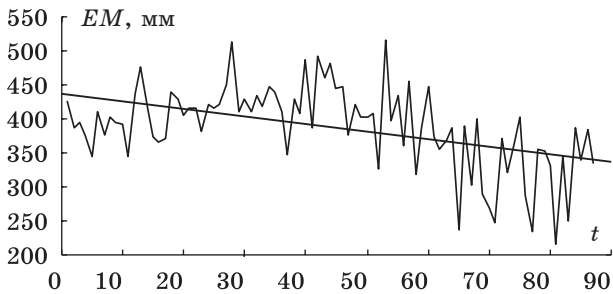
Наиболее заметные изменения ЭВБ происходят в районах Средней и Нижней Волги и районе Камы за период межени (лето – осень и зима). Как видно из рисунка, за период межени в целом по бассейну реки Волги атмосферные осадки имеют тенденцию к увеличению на 42 мм за 87 лет. Аналогичная тенденция наблюдается в динамике речного стока, увеличение которого составляет 25 мм за 87 лет. Суммарное испарение и изменение бассейновых влагозапасов за рассматриваемый период уменьшаются соответственно на 113 мм/87 лет и 130 мм/87 лет.



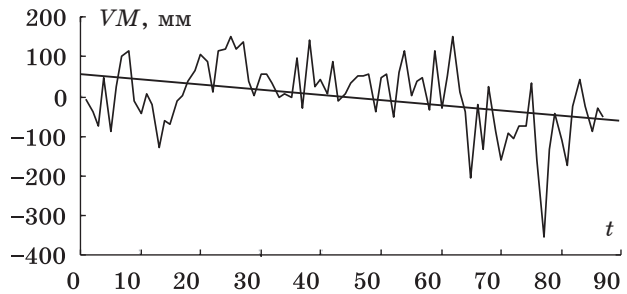
а



б



в



г

Изменение элементов водного баланса в бассейне реки Волги за период межени с 1914/1915 по 2000/2001 годы: а – атмосферные осадки; б – речной сток; в – суммарное испарение; г – изменение бассейновых влагозапасов.

Выявленное увеличение и снижение ЭВБ наиболее заметно за последнее 30-летие. При этом изменения ЭВБ за период весеннего половодья не столь существенны по сравнению с периодом межени. Одна из причин увеличения речного стока объясняется увеличением атмосферных осадков за рассматриваемый 87-летний период.

Уменьшение испарения, по-видимому, объясняется тем, что преимущество берут накопительные процессы на отдельных частных водосборах, которые влияют на снижение испарительной способности территории и усиление речного стока. В этом плане очень важно сопряженно анализировать не только элементы водного баланса, но и изменение термического режима рассматриваемых районов бассейна реки Волги.

В результате статистической обработки данных по увлажнению частных водосборов, водохозяйственных районов и бассейна в целом получена достаточно детальная картина распределения коэффициентов вариации увлажнения в бассейне реки Волги. Наибольшая изменчивость сумм атмосферных осадков за период половодья и межени наблюдается в южной части территории бассейна (частные водосборы, входящие в район Нижней Волги), которая изменяется от 0,22 до 0,30. Наименьшие значения коэффициента вариации наблюдаются в районах Верхней и

Средней Волги и Камы и колеблются от 0,15 до 0,19. Изменчивость суммарных осадков за период половодья и межени выше, чем изменчивость годовых осадков.

Коэффициент вариации речного стока за период половодья, начиная с частного водосбора Иваньковского водохранилища, постепенно уменьшается с 0,33 и на частном водосборе Куйбышевского водохранилища достигает 0,27, а затем, начиная с частного водосбора Саратовского водохранилища, повышается с 0,48 до 0,74 (частный водосбор Волгоградского водохранилища). Для района Камы коэффициент вариации речного стока в период половодья достаточно высок – 0,57 (частный водосбор Воткинского водохранилища). Для периода межени изменчивость речного стока также имеет высокое значение и колеблется от 0,33 (частные водосборы Чебоксарского и Камского водохранилищ) до 0,70 (частный водосбор Волгоградского водохранилища).

Наибольшее значения коэффициент вариации испарения за период половодья достигает в частных водосборах бассейна реки Камы и в районе Нижней Волги, а в районе Верхней Волги коэффициент вариации снижается и колеблется в пределах от 0,17 до 0,21.

Меженному периоду свойственно понижение коэффициента вариации до 0,06...0,10 для района Верхней Волги,

тогда как для района Камы и Нижней Волги коэффициент вариации повышается и достигает 0,32 (частный водосбор Волгоградского водохранилища).

Выводы

Происходящие в последнее время глобальные изменения климата проявились в Волжском бассейне. Так, начиная с 1980-х годов наблюдается постепенное увеличение стока реки Волги, что наиболее заметно проявляется в период межени (лето – осень – зима).

Характерной чертой является большая изменчивость режима увлажнения, во многом обусловленная особенностями атмосферной циркуляции отдельных лет.

Для бассейна реки Волги существенное значение имеет изменение бассейновых влагозапасов, причем наблюдается следующая закономерность в динамике изменения бассейновых влагозапасов: во всех 11 частных водосборах в период весеннего половодья происходит в основном процесс накопления (в диапазоне от 80 до 105 мм), а в период межени – процесс сработки накопившихся во время половодья влагозапасов. При этом максимальный уровень сработки бассейновых влагозапасов приходится на конец марта – начало апреля.

1. Исмаилов Г. Х., Федоров В. М.

Межгодовая изменчивость и взаимосвязь элементов водного баланса бассейна реки Волги // Водные ресурсы. – 2008. – Т. 35. – № 3. – С. 259–276.

2. Исмаилов Г. Х., Муращенкова Н. В. Пространственно-временные закономерности изменчивости и взаимосвязи ЭВБ половодья и межени в бассейне реки Волги в XX веке: Современные проблемы стохастической гидрологии и регулирования стока: Труды Всероссийской научной конференции, посвященной памяти выдающегося ученого-гидролога, профессора А. В. Рождественского. – М.: РосНИИВХ, 2012. – С. 354–363.

3. Гидрометеорологические условия Волжского региона и современные изменения климата / О. А. Анисимов [и др.] // Метеорология и гидрология. – № 5. – 2011. – С. 33–42.

Материал поступил в редакцию 28.04.12.

Исмаилов Габил Худуш оглы, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Гидрология, метеорология и регулирование стока»

Тел. 8 (499) 976-23-68

E-mail: gabil-1937@mail.ru

Муращенкова Наталья Владимировна, кандидат технических наук, доцент

Тел. 8 (499) 976-17-45

E-mail: splain75@mail.ru

УДК 502/504:551.311.2:551.33

О. Я. МАСЛИКОВА

Институт водных проблем РАН

ЗИМНИЕ НАВОДНЕНИЯ В УСЛОВИЯХ КРИОЛИТОЗОНЫ, ВЫЗВАННЫЕ ЛЕДОВЫМИ ЯВЛЕНИЯМИ НА РЕКАХ

Представлены результаты исследования влияния волн возмущения в нижних бьефах гидротехнических сооружений на деформации дна и берегов, в том числе и в условиях катастрофических наводнений, вызванных воздействием волн пусков или прорыва плотин и образованием ледовых заторов. Особое внимание уделено исследованию параметров, характеризующих вечномерзлые грунты.

Русловой поток, нижние бьефы, волны пусков, лед, заторы, вечномерзлые грунты, математические модели, лабораторное моделирование.

There are given investigation results of the disturbance waves influence downstream of hydraulic works on bottom and banks deformation including under the conditions of catastrophic floods caused by the impact of release waves or dams breakage and ice jams formation. A special attention is given to the investigation of parameters which characterize permanently frozen soils.

Channel flow, downstream, waves of releases, ice, jams, permanently frozen soil, mathematical models, laboratory simulation.