

Гидравлика и инженерная гидрология

УДК 502/504:556.11

Г. Х. ИСМАЙЛОВ

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

В. М. ФЕДОРОВ

Учреждение Российской академии наук «Институт водных проблем»

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ ГОДОВОГО ВОДНОГО БАЛАНСА БАССЕЙНА ВОЛГИ

Дана оценка возможных изменений элементов водного баланса бассейна реки Волги для различных сценариев изменения климата в первой половине XXI века. Для этой цели использованы данные изменения средней годовой температуры приземного воздуха и годовых осадков для первой половины XXI века (2011–2030 и 2031–2050 годы), полученные на основе реализации пяти моделей МОЦАО, разработанных в разных странах для двух сценариев антропогенной эмиссии парниковых газов в атмосферу (сценарии A_2 и B_1) применительно к бассейну реки Волги по отношению к современным условиям климата (1981–2000).

Прогноз, элементы водного баланса, испарения, изменения увлажненности территории, речной сток.

There is given an assessment of possible changes of elements of annual water balance of the Volga basin for various scripts of the climate change in the first half of the XXI century. For this purpose we used the data of the mean annual temperature change of the surface air and annual precipitations for the first half of the XXI century (2011–2030 and 2031–2050 years) obtained on the basis of realization of five models MSCAO developed in different countries for two scripts of anthropogenic emission of greenhouse gases into the atmosphere (scripts A_2 and B_1) as applied to the Volga river basin regarding present climatic conditions (1981–2000).

Forecast, elements of water balance, evaporations, area moisture changing, river flow.

В настоящее время существуют две концепции оценки возможных изменений элементов водного баланса речного бассейна в будущем. В течение

XX столетия преобладала концепция, в основе которой было представление о стохастической природе процессов формирования элементов водного баланса

(ЭВБ), и прежде всего речного стока, что предопределяло вероятностное описание закономерностей изменчивости ЭВБ во времени и пространстве с использованием наблюдаемых временных рядов осадков, испарения и стока. Выявленные закономерности характерны и для будущего. Такой подход подразумевает стационарность процессов формирования элементов водного баланса и, как следствие, возможность вероятностного предвидения их характера и параметров с нужной заблаговременностью.

Однако со временем правомочность допущений о стационарности процессов гидрологического цикла стала ставиться под сомнение в результате все возрастающего антропогенного воздействия на процессы формирования ЭВБ речных бассейнов. Кроме того, в конце XX века одной из важнейших проблем становится возможное изменение глобального климата Земли. Это связано с тем, что со второй половины XX века, особенно с последней его четверти, наблюдалось резкое потепление климата – 1990-е годы были самым теплым десятилетием за период инструментальных наблюдений. Основной причиной такого изменения климата считается антропогенная эмиссия парниковых газов и аэрозолей, которая будет только увеличиваться на протяжении XXI века.

Таким образом, оценка и учет последствий возможного изменения климата в XXI веке для водного баланса и режима речных бассейнов становится значимой и актуальной проблемой, решение которой необходимо для научного обоснования использования водных ресурсов России и защиты от опасных гидрологических процессов.

Принятие соответствующей концепции изменения ЭВБ в будущем обуславливает и выбор методов оценки этих изменений. Так, концепция стационарности климата и процессов гидрологического цикла предопределяет использование вероятностно-статистических методов. Принятие же концепции нестационарности приводит к необхо-

димости выявления однонаправленных тенденций (трендов) во временных рядах элементов водного баланса и определяющих их климатических и антропогенных факторов с последующей экстраполяцией детерминированной составляющей временного ряда, а также к установлению функциональных связей между факторами воздействия и характером отклика.

Для оценки возможных изменений ЭВБ бассейна реки Волги в первой половине XXI века в качестве исходных использовались временные ряды их годовых значений за 1914/15–2000/01 годы ($n = 87$ лет). Поскольку возможные изменения климата характеризуются прежде всего величинами изменения температуры воздуха и атмосферных осадков, в дополнение к временным рядам ЭВБ рассматривались ряды среднегодовой температуры воздуха за тот же период. Для всех временных рядов были определены выборочные оценки параметров распределений вероятностей [x_{cp} , C_v , C_s , $r(1)$] и оценки параметров линейных трендов за рассматриваемый период. Получены также оценки коэффициентов взаимной корреляции элементов водного баланса и их связи с температурой воздуха. В результате проведенного анализа установлено, что оценки параметров линейного тренда ЭВБ для всего рассматриваемого периода ($n = 87$ лет) являются статистически незначимыми и, следовательно, говорить об однонаправленных изменениях элементов водного баланса на протяжении XX века не приходится. В то же время для среднегодовой температуры воздуха оценки параметров линейного тренда оказались статистически значимыми, а сам тренд вида

$$T = 2,8 + 0,011t \quad (1)$$

свидетельствует о постепенном росте температуры в течение рассматриваемого периода, характеризуемого значимым положительным трендом:

$$T = +0,11 \text{ } ^\circ\text{C}/10 \text{ лет.}$$

Рассмотрение выборочных оценок коэффициентов взаимной корреляции

элементов водного баланса показало, что хорошими предикторами для оценки годового стока рек бассейна Волги являются эффективные осадки ($P - E$), для которых оценки коэффициентов корреляции со стоком во всех случаях превышают 0,90. Статистически значимыми являются также оценки коэффициентов корреляции стока с атмосферными осадками ($r > 0,50$) и испарением ($r > -0,40$). При этом повсеместно связь стока с испарением отрицательная.

В то же время обращает на себя внимание отсутствие связи между ЭВБ и средней годовой температурой воздуха как для частных водосборов, так и для стокоформирующей части бассейна (до города Волгограда). В результате оказывается, что использовать напрямую температуру воздуха, полученную для различных сценариев изменения климата XXI века, невозможно. Следовательно, в работе вместо температуры воздуха T авторами была использована температура испаряющей поверхности водосбора T^* .

Для оценки средней годовой температуры испаряющей поверхности водосбора T^* по известной величине суммарного испарения E было использовано уравнение связи годового испарения с осадками P и максимально возможным испарением или испаряемостью E_0 :

$$E = E_0 t h P / E_0 \quad (2)$$

и зависимость испаряемости от средней годовой температурой воздуха T :

$$E_0 = 329 + 62T + 2,14T^2. \quad (3)$$

Оказалось, что корреляция T^* и T для всех частных водосборов и для бассейна в целом пренебрежимо мала. В то же время корреляция T^* со стоком и испарением в отличие от T оказалась во всех случаях статистически значимой и относительно высокой. Так, для бассейна в целом коэффициент взаимной корреляции стока с температурой испаряющей поверхности T^* равен $-0,710$. Для оценки стока это позволило использовать уравнение вида

$$\Delta R_i = a \Delta P_i + b \Delta T_i^*, \quad (4)$$

где ΔR_i , ΔP_i , ΔT_i^* – отклонения величин стока,

осадков и температуры испаряющей поверхности i -го года от нормы за период 1914/1915–2000/2001 годов, соответственно равные 191 мм/год, 665 мм/год и 3,6 °С.

Для бассейна реки Волги до города Волгограда это уравнение имеет следующий вид:

$$\Delta R = 0,294 \Delta P - 23,6 \Delta T^*, \quad (5)$$

где $r^2 = 0,98$.

Оценка многолетнего тренда для температуры в целом для бассейна за период 1914/15–2000/2001 годов показала отсутствие тренда: $r(T^*, t) = -0,18 \pm 0,10$. В то же время оказалось, что значительный тренд присущ разности $T_i^* - T$: $r(T_i^* - T, t) = -0,34 \pm 0,09$. Соответственно имеем следующее уравнение тренда:

$$T_i^* - T = 1,14 - 0,019t \text{ °С}. \quad (6)$$

Оказалось также, что разность температур испаряющей поверхности водосбора и приземного слоя воздуха зависит как от температуры воздуха, так и от атмосферных осадков предшествующего года. При этом имеет место обратная зависимость, поскольку коэффициенты корреляции равны соответственно $-0,65$ и $-0,54$:

$$(T_i^* - T) = -0,946T_i - 0,009P_{i-1} + 9,4, \quad (7)$$

где $r^2 = 0,70$.

Используя зависимость (7) и имея оценку годовой температуры воздуха, можно определить и температуру испаряющей поверхности водосбора, а затем по уравнениям (2) и (3) – испаряемость и суммарное испарение. Данные об осадках и испарении позволяют оценить годовой сток. В этом случае используется зависимость аномалий стока от аномалий осадков и испарения, которая для бассейна реки Волги до города Волгограда имеет следующий вид:

$$\Delta R = 0,441 \Delta P - 0,633 \Delta E, \quad (8)$$

где $r^2 = 0,99$.

Аномалии стока, осадков и испарения определяются относительно их среднемноголетних значений за период 1914/15–2000/2001 годов, равных соответственно 191, 665 и 474 мм/год.

Таким образом, имея оценки годовой температуры воздуха и атмосферных осадков, полученные по моделям

МОЦАО для различных сценариев изменения климата, используя уравнения (2)...(8), можно оценить и другие элементы водного баланса бассейна реки Волги и ее частных водосборов в условиях возможного изменения климата в XXI веке.

Исходя из изложенных предположений о стационарности полученных временных рядов ЭВБ бассейна Волги и частных водосборов водохранилищ, т. е. принимая гипотезу о том, что климат XXI века не претерпит изменений в сравнении с климатом XX века, оценим диапазон возможных изменений среднемноголетних величин элементов водного баланса бассейна реки Волги до города Волгограда в первой половине XXI века:

$$\bar{X}_{n+\tau} = \bar{X}_n \pm t_p K \sigma_{x_n}^- , \quad (9)$$

где X – среднемноголетнее значение ЭВБ; n – продолжительность исходного временного ряда;

τ – продолжительность перспективного отрезка времени; t_p – критерий достоверности Стьюдента для уровня вероятности p ; K – коэффициент уменьшения точности оценки в зависимости от продолжительности перспективного периода τ ; $\sigma_{x_n}^-$ – оценка среднеквадратичной ошибки среднего исходного временного ряда.

Оценка погрешности определения среднего определяется с учетом коэффициента автокорреляции в исходном временном ряду:

$$\sigma_{x_n}^- = \frac{\sigma_x}{\sqrt{n}} \sqrt{\frac{1+r(1)}{1-r(1)}} , \quad (10)$$

где σ_x – стандарт отклонения годовых величин ЭВБ для исходного ряда продолжительностью n лет.

В табл. 1 приведена оценка возможного изменения среднемноголетних величин элементов водного баланса бассейна реки Волги до города Волгограда.

Для $\tau = 20, 40$ и 60 лет ($t_{0,95} = 1,98$) $K = 1,02; 1,13$ и $1,20$ соответственно [1].

Таблица 1

Оценка среднемноголетних условно-естественных величин элементов водного баланса бассейна реки Волги для первой половины XXI века в условиях неизменности климата, мм/год

ЭВБ	Период, годы			
	1914/1915–2000/01 годы, $\bar{X} \pm t_{95} \sigma_x^-$	1914/1915–2020/2021 годы, $\bar{X} \pm t_{95} K \sigma_x^-$	1914/1915–2040/2041 годы, $\bar{X} \pm t_{95} K \sigma_x^-$	1914/1915–2060/2061 годы, $\bar{X} \pm t_{95} K \sigma_x^-$
Осадки, \bar{P}	665 ± 19	665 ± 20	665 ± 21	665 ± 23
Сток, \bar{R}	191 ± 12	191 ± 13	191 ± 14	191 ± 15
Испарение, \bar{E}	474 ± 10	474 ± 10	474 ± 11	474 ± 12
Изменение влагозапасов, $\bar{\Delta V}$	0 ± 12	0 ± 12	0 ± 14	0 ± 14

Как видно из этой таблицы, за период 1914/1915–2060/2061 годов ($n = 147$ лет) возможный диапазон изменения среднемноголетней величины атмосферных осадков составит от 688 до 642 мм/год. В результате для первой половины XXI века (период с 2001/2002 по 2060/2061 годы, $n = 60$ лет) возможное изменение годовых осадков составит 721...608 мм/год.

Для речного стока диапазон изменения составляет 206...176 мм/год (для периода 2001/2002–2060/2061 годов – от 227 до 154 мм/год); для испарения – соответственно 486...462 и

503...444 мм/год; для изменения бассейновых влагозапасов – соответственно ±17 мм/год.

В табл. 2 приведены оценки элементов водного баланса бассейна реки Волги при изменении климата в XXI веке. Климат характеризуется положительным трендом температуры воздуха и отрицательным трендом разности температур испаряющей поверхности и воздуха (вариант 1). Вариант 2 предусматривает оценку T_i^* по уравнению (7). Как видно из данных таблицы, за период 2001/02–2060/61 годов при неизменных среднемноголетних

осадках 665 мм/год, повышении сред-
немноголетней годовой температуры
воздуха до 4,1 °С (на +0,8 °С по отно-
шению к средней температуре в XXI
веке), при крайних ее значениях в пре-
делах 3,8...4,4 °С диапазон изменения
речного стока составит 186...219 мм/год

при среднем значении за этот период
191...202 мм/год. Среднемноголетняя
величина годового испарения составит
456...474 мм/год при крайних значе-
ниях от 429 до 480 мм/год. Бассейно-
вые влагозапасы будут меняться в ди-
апазоне от +2 до -17 мм/год.

Таблица 2

**Оценка среднемноголетних величин элементов водного баланса бассейна
реки Волги для первой половины XXI века (2001/2002–2060/2061)
при условии сохранения выявленного тренда
в изменении температуры воздуха**

Период ЭВБ	1914/1915–2000/2001 годы (n = 87 лет)	2001/2002–2060/2061 годы (n = 60 лет)					
		\bar{T}		T_{\max}		T_{\min}	
		1	2	1	2	1	2
\bar{T}	3,3	4,1	4,1	4,4	4,4	3,8	3,8
$T^* - T$	0,3	-1,0	-0,5	-0,6	-0,7	-1,4	-0,2
T^*	3,6	3,1	3,6	3,8	3,7	2,4	3,6
\bar{P}	665	665	665	665	665	665	665
\bar{E}_0	580	542	580	596	588	490	580
\bar{E}	474	456	474	480	477	429	474
$R(P, T^*)$	191	203	191	186	189	219	191
$R(P, E)$	191	202	191	187	189	219	191
ΔV_1	0	-6	0	+1	+1	-17	0
ΔV_2	0	-7	0	+2	+1	-17	0

Если сопоставить среднемноголет-
ние величины элементов водного балан-
са, полученные с учетом выявленного
тренда в изменениях средней годовой
температуры воздуха, с оценками по
традиционной вероятностно-статисти-
ческой модели, то оказывается, что они
не выходят за пределы диапазона воз-
можного их изменения в первой поло-
вине XXI века, полученного по модели.

Как уже отмечалось, в настоящее
время для оценки возможных измене-

ний глобального и, как следствие, реги-
онального климата в XXI веке для раз-
личных сценариев антропогенного
увеличения концентрации парниковых
газов в атмосфере широко используются
модели общей циркуляции атмосфе-
ры и океана (МОЦАО). В табл. 3 по
данным работы [2] приведены резуль-
таты оценки изменения средней годо-
вой температуры приземного воздуха
и годовых осадков для первой полови-
ны XXI века (2011–2030 и 2031–

Таблица 3

**Среднемноголетние значения температуры воздуха (\bar{T} °С) и годового
количества атмосферных осадков (\bar{P} , мм/год) в бассейне реки Волги
по моделям МОЦАО для первой половины XXI века**

Модель	Сценарий A ₂				Сценарий B ₁			
	2011–2030 годы		2031–2050 годы		2011–2030 годы		2031–2050 годы	
	\bar{T}	\bar{P}	\bar{T}	\bar{P}	\bar{T}	\bar{P}	\bar{T}	\bar{P}
ЕCHAM 5-OM	4,6	719	5,7	753	5,0	744	5,7	754
Had CM 3	4,9	672	6,1	682	5,4	671	5,9	684
GFDL CM 2.0	4,6	688	5,5	710	4,9	721	5,6	732
CSIRO MK3.0	4,9	711	5,6	699	4,6	678	5,3	691
CGCM 2.3.2	3,9	709	4,0	726	4,2	721	4,4	717
Среднее значение	4,6	700	5,5	714	4,8	707	5,4	716

Примечание: для условий современного климата (1981–2000) $\bar{T} = 3,9$ °С и $\bar{P} = 690$ мм/год.

2050 годы), полученные на основе реализации пяти моделей МОЦАО, разработанных в разных странах для двух сценариев антропогенной эмиссии парниковых газов в атмосферу (сценарии A_2 и B_1) применительно к бассейну реки Волги по отношению к современным условиям климата (1981–2000).

Как видно из таблицы, для сценария A_2 средняя годовая температура воздуха увеличивается в среднем на 0,7...1,6 °С, а атмосферные осадки – на 10...24 мм/год по сравнению с современным климатом. Для сценария B_1 увеличение составляет 0,9...1,5 °С и 17...26 мм/год.

В соответствии с данными табл. 3 и с учетом уравнений (2)...(8) была проведена оценка стока, испарения и изменения бассейновых влагозапасов (средних) по двадцатилетним периодам первой половины XXI века. Полученные оценки элементов водного баланса бассейна реки Волги до города Волгограда приведены в табл. 4. Для сценария A_2 (период 2011–2030 годы) при средней годовой температуре воздуха 4,6 °С и атмосферных осадках 700 мм/год средний за период сток составляет 210...212 мм/год (увеличился на

3...5 мм/год по сравнению с современным), суммарное испарение – 469 мм/год (увеличилось на 2 мм/год), изменение влагозапасов характеризуется их накоплением до 19...21 мм/год (прирост влагозапасов 3...5 мм/год). Для отдельных моделей сток изменяется в пределах от 202 до 217 мм/год, испарение – от 462 до 474 мм/год, а накопление влаги в бассейне – 6...30 мм/год.

Для периода 2031–2050 годов средняя температура воздуха составляет 5,5 °С (увеличение на 1,6 °С) при атмосферных осадках 714 мм/год (увеличение на 2,4 мм/год). В этих условиях сток увеличивается до 216...218 мм/год (на 9...11 мм/год по сравнению с современным), испарение достигает 469 мм/год, а прирост влагозапасов – 27...29 мм/год.

Таким образом, для этого сценария увеличения эмиссии парниковых газов в атмосферу для 40-летнего периода (2011–2050) средняя многолетняя температура воздуха составила 5,0 °С (прирост на 1,1 °С по сравнению с современной), атмосферные осадки – 707 мм/год (прирост – 17 мм/год), испарение – 469 мм/год (прирост – 2 мм/год), речной сток – 214 мм/год

Таблица 4
Средние за двадцатилетия элементы водного баланса бассейна Волги до города Волгограда в первой половине XXI века для изменения температуры воздуха и атмосферных осадков по сценарию A_2

ЭВБ	Сценарий A_2											
	2011–2030 годы						2031–2050 годы					
	1	2	3	4	5	Среднее значение	1	2	3	4	5	Среднее значение
T °С	4,6	4,9	4,6	4,9	3,9	4,6	5,7	6,1	5,5	5,6	4,0	5,5
\bar{P}	719	672	688	711	709	700	753	682	710	699	726	714
\bar{P}_{i-1}	690	690	690	690	690	690	719	672	688	711	709	700
$[T^* - T]$	-1,4	-1,7	-1,4	-1,7	-0,8	-1,4	-2,8	-2,7	-2,3	-2,5	-1,1	-2,4
$[T^*]$	3,2	3,2	3,2	3,2	3,1	3,2	2,9	3,4	3,2	3,1	2,9	3,1
$[R]_{P,T^*}$	217	204	208	215	217	212	235	201	215	214	227	218
$[E_0]$	549	549	549	549	542	549	527	564	549	542	527	542
$[E]$	474	462	466	472	468	469	470	472	472	466	464	469
$[\Delta V]$	-28	-6	-14	-24	-24	-19	-48	-9	-23	-19	-35	-27
$[R]_{P,E}$	215	202	206	212	214	210	232	200	212	211	224	216
$[\Delta V]$	-30	-8	-16	-27	-27	-21	-51	-10	-26	-22	-38	-29

(прирост – 7 мм/год) и накопление влагозапасов в бассейне – 24 мм/год (прирост – 8 мм/год). Эти оценки элементов водного баланса также находятся в пределах 95%-го доверительного интервала оценок среднемноголетних величин ЭВБ, полученных для периода 2001/02–2060/61 годов на основе вероятностно-статистической модели.

Аналогичная оценка была выполнена для сценария V_1 . Для сценария V_1 увеличения эмиссии парниковых газов в атмосферу для периода 2011–2030 годов при средней годовой температуре воздуха 4,8 °С и атмосферных осадках 707 мм/год средний годовой сток составляет 211...214 мм/год (увеличился на 4...7 мм/год по сравнению с современным), суммарное испарение составило 471 мм/год, а прирост запасов воды в бассейне составил 22...25 мм/год, что на 6...9 мм/год превышает современный уровень. Для отдельных моделей сток меняется в пределах от 202 до 225 мм/год, испарение – от 461 до 480 мм/год, приращение влагозапасов – от 7 до 42 мм/год.

Для периода 2031–2050 годов при средней температуре воздуха 5,4 °С и осадках 716 мм/год сток увеличился до 218...222 мм/год (на 11...15 мм/год в сравнении с современным уровнем), среднемноголетнее испарение уменьшилось на 1 мм/год и составило 466 мм/год, прирост влагозапасов составил 28...32 мм/год (увеличился на

12...16 мм/год по сравнению с современным уровнем).

В целом анализ полученных оценок элементов водного баланса бассейна реки Волги для первой половины XXI века позволяет сделать вывод о том, что среднемноголетний условно-естественный годовой сток Волги у Волгограда может увеличиться на 10...15 % по сравнению с XX веком, среднемноголетний годовой сток которого был равен 19 мм/год. Разумеется, необходимо непрерывно следить за величиной элементов водного баланса, с тем чтобы вовремя оценить изменения в характере их межгодовой изменчивости и адаптировать параметры выявленных эмпирических зависимостей к новым условиям формирования и взаимосвязи ЭВБ бассейна реки Волги.

1. **Семенов С. М.** Гидрогеологические прогнозы в системе мониторинга подземных вод. – М.: Наука, 2005. – 131 с.

2. Водные ресурсы России и их использование / Под ред. И. А. Шикломанова. – СПб.: ГГИ, 2008. – 600 с.

Материал поступил в редакцию 17.04.10.

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

Тел. 8 (499) 976-23-68

E-mail: Ism37@mail.ru

Федоров Владимир Михайлович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник

Тел. 8 (499) 135-04-06