

Формирование временных рядов гидрометеорологической информации для оценки изменчивости элементов водного баланса

Исмайлова И. Г.¹, соискатель степени кандидата техн. наук
(РГАУ-МСХА имени К. А. Тимирязева),

Раткович Л. Д.², доктор техн. наук (РГАУ-МСХА имени К. А. Тимирязева)

В работе рассматриваются методические подходы к формированию длительных временных рядов элементов водного баланса с целью оценки и прогноза речных вод в замыкающем створе речного водосбора на примере бассейна реки Волги. Предлагаются новые подходы определения трудно измеряемых элементов водного баланса, таких как суммарное испарение и изменение бассейновых влагозапасов.

Ключевые слова: атмосферные осадки, суммарное испарение, бассейновые влагозапасы, водный баланс, речной бассейн, речной сток, элементы водного баланса, межгодовая изменчивость.

Generation of hydrometeorological information time series to evaluate the variability of water balance elements

Ismailova I. G.¹, Candidate's Degree Competitor
(RSAU — MTAA named after K. A. Timiryazev),

Ratkovich L. D.², Doctor of Technical Sciences
(RSAU — MTAA named after K. A. Timiryazev)

The paper deals with methodological approaches to generation of long-term time series of water balance elements in order to estimate and forecast river flow in the closing section of the river catchment on the example of the Volga river basin. New approaches are proposed for determining difficult-to-measure elements of the water balance, such as total evaporation and changes in basin moisture content.

Keywords: atmospheric precipitation, evapotranspiration, basin moisture content, water balance, river basin, river flow, water balance elements, inter-annual variability.

Одной из наиболее важных проблем, которая на протяжении XX века решалась гидрологической наукой, является развитие процесса формирования речного стока в речных бассейнах. Речной сток, в отличие от других видов природных ресурсов, является непрерывно возобновляемым в процессе круговорота влаги на Земле, а также характеризуется большой изменчивостью во времени и пространстве. Развитие водопотребления населения и отраслей экономики и проблема безопасности окружающей среды послужили дальнейшим стимулом для более широкого подхода к изучению речного стока, рассмотрению его как одного из элементов водного баланса в тесной связи с климатом и ландшафтом Земли. Это, в свою очередь, потребовало изучения всего гидрологического цикла, происходящего в речном бассейне, включая изменения во времени и пространстве суммарных атмосферных осадков, суммарного испарения с поверхности речного бассейна, инфильтрацию воды в почву и динамику влаги в почве-грунтовой толще и, наконец, притока

речных вод в замыкающем водоёме. В связи с этим необходимым условием является формирование длительных временных рядов суммарных атмосферных осадков (P), речного стока (R), суммарного испарения с поверхности речного водосбора (E) и изменения бассейновых влагозапасов ($\pm\Delta V$).

Благодаря существующим опорным гидрологическим и метеорологическим станциям, в нашем распоряжении имеются длительные временные ряды атмосферных осадков и речного стока для современного климата. Для определения этих двух элементов водного баланса в работе сформированы два базисных периода: первый период: 1891/1892 – 2020/2021 ($n = 130$ лет, длительный период), второй период: 1914/1915 – 2020/2021 ($n = 107$ лет, короткий период). По многолетним значениям годовых осадков по данным МЦД (meteo.ru) получили длительные ряды наблюдений суммарных атмосферных осадков за период 1891/1892 – 2020/2021 гг. При этом, используя данные указанного портала по опорным метеостанциям, были определены средние осадки по 11 частным водосборам бассейна реки Волги с весами пропорционально площадям административных

¹ igism37@mail.ru

² levkivr@mail.ru

областей в пределах водосбора, а затем в целом по бассейну реки Волги в зоне формирования до Волгограда.

Были использованы две версии временного ряда годового стока реки Волги в зоне формирования у города Волгограда (данные АО “Институт Гидропроект”): фактическая (наблюдённая) и условно-естественная (восстановленная). Для ряда 1891/1892 – 1934/1935 годов годовой сток обеих версий совпадает, а для 1935/1936 – 2000/2001 годов сток первой версии отражает интегральное влияние антропогенных факторов на речной сток бассейна Волги. Кроме этого, в условиях современного климата (базовый период) для оценки межгодовой изменчивости используется условно-естественный сток реки Волги в зоне формирования у Волгограда за период 1914/1915 – 2020/2021. Также использованы наблюдения за температурой приземного воздуха для условий современного климата (базовый) за период 1901/1902 – 2020/2021 годов. Естественно, возникает потребность получения длительных временных рядов суммарного испарения с поверхности суши и изменения бассейновых влагозапасов бассейна реки Волги в зоне формирования у города Волгограда. С этой целью авторами предлагается методика определения трудно измеряемых составляющих водного баланса, таких как суммарное испарение и изменение бассейновых влагозапасов при наличии длительных временных рядов суммарных атмосферных осадков и речного стока.

Методология. Некоторые аспекты проблемы изменения элементов водного баланса рассматривались в работах [1, 2]. Наиболее распространенным подходом к определению суммарного испарения с использованием только данных по стоку и осадкам является его оценка по разности суммарных атмосферных осадков и речного стока. Этот подход широко используется при оценке средне-многолетних величин годового суммарного испарения при допущении, что изменение бассейновых влагозапасов для средних и крупных речных бассейнов за достаточно длительный период времени близко к нулю. Так как изменение бассейновых влагозапасов в конкретные годы и в целом за год, а тем более за сезон, месяц, декаду или сутки априори отлично от нуля, такой подход чреват большими погрешностями. В связи с этим нами рассматриваются два подхода оценки изменений элементов водного баланса речного бассейна. В первом подходе исходим из решения систем уравнений балансового типа, учитывающих распределение атмосферных осадков на формирование речного стока, суммарного испарения с поверхности речного бассейна и изменение бассейновых влагозапасов. Данный методический подход для решения поставленной задачи

изложен в работе [3]. В настоящих исследованиях рассматривается второй подход, в основе которого используется корреляционное уравнение, связывающее закономерности формирования речного стока текущего периода со стоком предыдущих лет.

Для описания колебаний стока предлагались различные модели. В качестве основного недостатка большинства из них следует отметить недостаточную обоснованность типа корреляционных зависимостей. При этом отсутствие доказательств статистической достоверности получаемых результатов делает ряд моделей неприемлемыми с точки зрения инженерного приложения. По-видимому, стохастическая модель стока весьма сложна и категорически отвергать существование так называемых “дальних связей” было бы неверно. Приемлемый выход состоит в использовании простой модели, непротиворечащей (в статистическом смысле) накопленным материалам наблюдений и обеспечивающей решение прикладных задач. Начиная с работы С. Н. Крицкого и М. Ф. Менкеля [4], последовательности годовых значений речного стока принято рассматривать как реализации марковского процесса. Построение алгоритма моделирования негауссовского случайного вектора с взаимно- и авто-коррелированными компонентами изложено в работе [5]. Существенным аргументом в пользу принятия марковской модели колебания стока являются индивидуальные оценки коэффициента автокорреляции. Таким образом, в целом марковская модель принята в качестве практически приемлемого приближения для многолетних колебаний речного стока. Соответственно, на основе второго подхода в качестве модели годового стока могут применяться различные модификации простой цепи Маркова. В этом случае связь между стоками смежных лет может представляться в виде корреляционного уравнения:

$$R_i = R_{i, \text{cp}} + r(1) \frac{\sigma_i}{\sigma_{i-1}} (R_{i-1} - R_{i-1, \text{cp}}), \quad (1)$$

где R_i — годовой сток i -го года, $r(1)$ — коэффициент корреляции.

Для достаточно длительного периода $n > 30$ можно принять $R_{i, \text{cp}} = R_{i-1, \text{cp}}$ и $\sigma_i = \sigma_{i-1}$, тогда уравнение (1) примет следующий вид:

$$[R_i] = r(1)R_{i-1} + R_{i, \text{cp}}(1 - r(1)). \quad (2)$$

В уравнении (2) первое слагаемое правой части можно рассматривать как детерминированную составляющую стока текущего года, формирующуюся за счёт аккумуляции части осадков предшест-

вующего года и их сработки в следующем году. Тогда справедливо, следующее:

$$P_{AK,i} = r(1)R_i, \quad (3)$$

$$P_{CPAB,i} = P_{AK,i-1} = r(1)R_{i-1}, \quad (4)$$

$$\Delta V_i^{(1)} = P_{CPAB,i} - P_{AK,i} = r(1)(R_{i-1} - R_i). \quad (5)$$

С учётом (4) в стоке i -го года, возможны две составляющие. Первая определяется величиной сработки части осадков предшествующего года, $P_{CPAB,i}$, а вторая — осадками текущего года за вычетом аккумуляции, т.е.

$$R_i = P_{CPAB,i} + R_T = r(1)R_{i-1} + R_T, \quad (6)$$

$$R_T = R_i - r(1)R_{i-1}, \quad (7)$$

$$P_T = P_i - P_{AK,i} = P_i - r(1)R_i. \quad (8)$$

В этом случае предлагаемый алгоритм оценки испарения реализуется применительно к осадкам текущего года за вычетом их аккумуляционной составляющей, участвующей в формировании стока последующего и текущего года, т.е. вместо P_i и R_i используются P_T и R_T . В этом случае изменение бассейновых влагозапасов имеет две составляющие:

$$\begin{aligned} \Delta V_i &= \Delta V_i^{(1)} + \Delta V_i^{(2)} = \\ &= r(1)(R_{i-1} - R_i) + [\Delta V_{iR,T}] + [\Delta V_{iE,T}]. \end{aligned} \quad (9)$$

Для оценки $[\Delta V_{iR,T}]$ и $[E_{i,T}]$ могут быть использованы эмпирические зависимости, что и в первом случае. Чтобы реализовать предлагаемые алгоритмы оценки ежегодных значений испарения, необходимо располагать многолетними данными годовых значений элементов водного баланса по речным бассейнам, находящихся в различных природных зонах. Были использованы результаты исследований, проведённые на сети воднобалансовых станций, данные по водному балансу для водосборов Валдайской станции ГГИ, для ряда пунктов между речья р. Волги и Оби [6], и р. Хиджи (Япония) [7], а также использованы данные, опубликованные в научно-прикладном справочнике под редакцией М. Л. Маркова [8]. Временные ряды по этим водосборам имеют длительность от 16 до 36 лет. Данные между речья и Оби [6] получены не для водосборов рек, а для отдельных станций с учётом изменений влагозапасов в зоне активного водообмена и с оценкой “климатического стока”. В соответ-

ствии с предлагаемым подходом, по всем указанным водосборам были определены годовые величины изменения влагозапасов по стоку и испарению, статистические параметры временных рядов элементов водного баланса и коэффициенты взаимной корреляции, включая коэффициенты корреляции изменения влагозапасов по испарению с осадками, стоком и изменением влагозапасов по стоку. В результате было установлено, что наиболее приемлемой для оценки изменения влагозапасов по испарению, является зависимость вида:

$$[\Delta V_{iE}] = a_1[\Delta V_{iR}] + a_2\Delta P_i - [\Delta V_{iR}]_{cp}, \quad (10)$$

где $[\Delta V_{iE}]_{cp} = -[\Delta V_{iR}]_{cp}$, при $[\Delta V_i]_{cp} = 0$, а $[\Delta V_{iR}]_{cp} = R_{cp} - 0,5P_{cp}$.

Используя уравнение (10), приходим к окончательному виду $[\Delta V_{iE}]$, а затем определяем ежегодное испарение:

$$[E_i] = 0,5P_i + [\Delta V_{iE}]. \quad (11)$$

Далее для $[E_i]$ определяем выборочные оценки основных статистических параметров (средние, стандарт, коэффициент вариации, коэффициент асимметрии и коэффициент автокорреляции). Полученные статистические параметры для расчётного $[E_i](x)$ сопоставляются с аналогичными параметрами для наблюдаемого (фактического) $E_i(y)$. Далее устанавливается степень согласия расчётных и фактических значений испарения, для чего используется классический критерий степени согласия (η), корреляционное отношение, имеющее вид:

$$\eta_{yx}^2 = 1 - \frac{\Delta^*{}^2}{\sigma_y^2} = R^2, \quad (12)$$

где Δ^* — отклонение расчётного испарения от наблюдаемого, σ_y — среднеквадратическое отклонение наблюдаемого испарения, равного коэффициенту детерминации R^2 . Таким образом, получаем окончательный вид уравнения (10), по которому определяется $[\Delta V_{iE}]$.

Реализовав вышеуказанный подход для ряда бассейнов, по которым располагаем данными об элементах водного баланса за многолетний период, для каждого из них получаем значения коэффициентов корреляции годовых изменений влагозапасов по испарению с осадками $r([\Delta V_E], P)$, по испарению со стоком $r([\Delta V_E], R)$, по испарению и по стоку $r([\Delta V_E], [\Delta V_R])$, среднеквадратическое отклонение по испарению $\sigma([\Delta V_E])$, по стоку $\sigma([\Delta V_R])$, $\sigma(R)$, по осадкам $\sigma(P)$, которые должны быть известны для

определения параметров уравнений вида (10). Затем осуществляется поиск эмпирических зависимостей, связывающих их с известными факторами, например, со среднемноголетним коэффициентом годового стока. Такие зависимости используются затем при определении $[\Delta V_{iE}]$, $[E_i]$ и $[\Delta V_i]$ в случае наличия данных лишь по годовым осадкам и стоку за многолетний период для рассматриваемого бассейна. Предложенный подход предполагает участие всех осадков текущего года в формировании стока, испарения и бассейновых влагозапасов этого года. В то же время многочисленные исследования [1, 2, 9] свидетельствуют о том, что помимо осадков текущего года в формировании средних и крупных бассейнов участвуют осадки за ряд предшествующих лет, и, кроме того, реки дренируют не только грунтовые воды, но и воды более глубоких водоносных горизонтов, области питания которых зачастую находятся вне рассматриваемого бассейна. Предлагаемый подход к оценке ежегодных значений испарения и бассейновых влагозапасов должен каким-то образом учитывать этот факт. Соответственно изложенному, в статье предлагается второй подход, опирающийся на модель годового стока, предложенную в работах [1, 2].

Используя имеющиеся многолетние данные элементов водного баланса по вышеуказанным воднобалансовым станциям и метеостанции г. Оренбурга, и выполняя соответствующую идентификацию, получены следующие уравнения:

$$[\Delta V_{iE}] = -0,334\Delta[\Delta V_{iR}] - 0,222\Delta P_i + 86; \quad (13)$$

$$[\Delta V_{iE}] = -0,044\Delta[\Delta V_{iR}] - 0,419\Delta P_i - 351; \quad (14)$$

$$[\Delta V_{iE}] = -0,475\Delta[\Delta V_{iR}] - 0,035\Delta P_i + 143. \quad (15)$$

По уравнениям (13)–(15) были рассчитаны ежегодные значения изменения влагозапасов по испарению, а затем и самого испарения. Для полученных временных рядов годового испарения определялись оценки их статистических параметров, которые сопоставлялись с параметрами исходных рядов испарения. Полученные результаты для бассейнов рек Полометь, Хиджи и метеостанции г. Оренбург приведены в табл. 1.

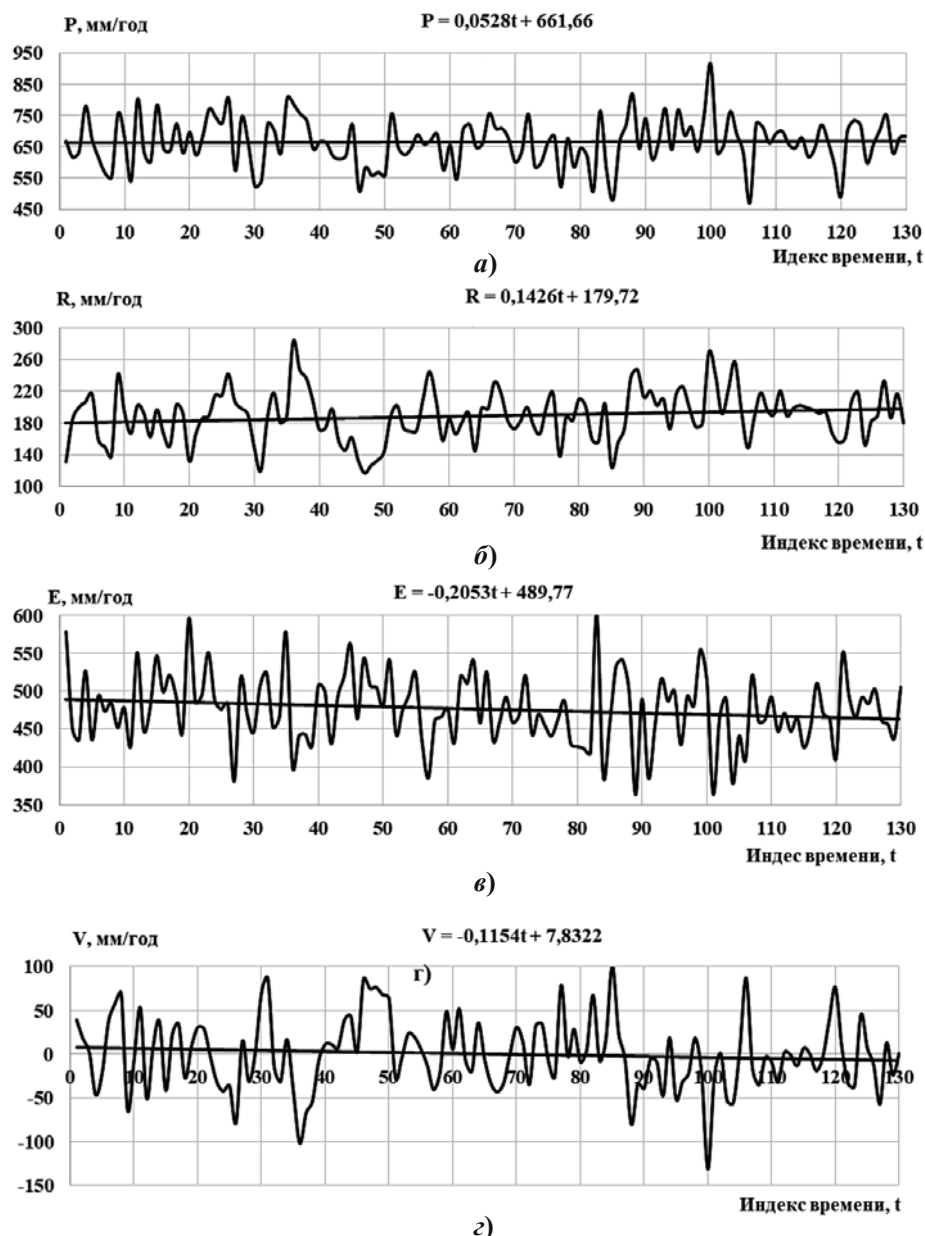
Как видно, по всем параметрам эти ряды достаточно близки. Кроме того, полученные из формулы (12) оценки критерия η оказались достаточно высокими ($\eta > 0,80$). Аналогичные результаты были получены и по всем остальным водосборам, что даёт основание считать предлагаемый подход оценки годового испарения достаточно обоснованным.

Для практической реализации предлагаемого подхода необходимо оценить параметры уравнения (10), связывающего изменение влагозапасов по испарению с определяющими его факторами, в частности, с изменением влагозапасов по стоку и атмосферным осадкам. Поскольку уравнение (10) является уравнением двухфакторной линейной регрессии, для оценки его параметров необходимо иметь оценки стандартов осадков и изменения влагозапасов по стоку и испарению, а также коэффициенты корреляции этих переменных. По данным об осадках и стоке в соответствии с принятым подходом можно оценить непосредственно стандарты осадков и изменения влагозапасов по стоку и соответствующие коэффициенты корреляции. На основе соответствующих данных по рассматриваемым водосборам были получены эмпирические зависимости, позволяющие получить оценку стандартных отклонений влагозапасов по испарению и их корреляцию с осадками и изменением влагозапасов по стоку. Оказалось, что коэффициенты корреляции измене-

Т а б л и ц а 1

Статистические параметры временных рядов расчетного $[E_i]$ и фактического E_i годового испарения, мм/год

Параметры	р. Полометь ($n = 16$ лет)		р. Хиджи ($n = 36$ лет)		г. Оренбург ($n = 33$ года)	
	$[E]$	E	$[E]$	E	$[E]$	E
M	507	507	563	563	390	390
σ	45	45	17	19	58	62
C_v	0,08	0,09	0,03	0,03	0,15	0,16
A	139	140	62	66	219	239
R_{EP}	0,89	0,79	0,95	0,82	0,95	0,91
$r(1)$	0,24	0,32	0,11	0,22	0,29	0,28
η	0,88	–	0,86	–	0,95	–



Многолетние колебания годовых ЭВБ бассейна р. Волги в зоне формирования за период 1891/1892 – 2020/2021: а) атмосферные осадки (P); б) речной сток (R); в) суммарное испарение (E); г) изменение бассейновые влагозапасы ($\pm\Delta V$). Для условий современного климата (базовый период): $\bar{P} = 665$ мм/год; $\bar{R} = 189$ мм/год ($257 \text{ км}^3/\text{год}$); $\bar{E} = 476$ мм/год; $\pm\Delta V = 0,0$ мм/год

ния влагозапасов по испарению с осадками и изменением влагозапасов по стоку зависят от средне-многолетнего коэффициента годового стока, а стандарт изменения влагозапасов по испарению в первом приближении может быть равным стандарту изменения влагозапасов по стоку.

Результаты. С целью оценки изменения водных ресурсов бассейна р. Волги в будущем была использована предлагаемая методика расчёта водного баланса речного бассейна. Соответственно, получены длительные временные ряды для суммарного испарения с поверхности суши и изменения бассейновых влагозапасов бассейна реки Волги в зоне формирования стока у Волгограда для условия современного климата (базовый период) для

двух периодов: с 1891/1892 – 2020/2021 гг. ($n = 130$ лет) и период с 1914/1915 – 2020/2021 гг. ($n = 107$ лет).

Наличие таких длительных временных рядов элементов водного баланса бассейна реки Волги в зоне формирования у города Волгограда позволило выявить не только межгодовые изменчивости речного стока, но и установить связь между речным стоком и основными стокоформирующими факторами (атмосферные осадки, суммарное испарение и температура подстилающей поверхности).

Как видно из табл. 2. и рисунка, начиная с 1914/1915 до 1929/1930 года (первый интервал) и с 1978/1979 – 2001/2002 гг. (второй интервал) наблюдается повышение значений атмосферных осадков.

Выборочные оценки статистических параметров временных рядов элементов водного баланса (разной продолжительности) р. Волги в зоне формирования у г. Волгограда, мм/год, за период 1891/1892 – 2020/2021 гг.

Периоды	Число лет	Статистические параметры								
		P_{cp}	σ_P	C_v	R_{cp} (в %)	σ_R	C_v	E_{cp} (в %)	σ_E	C_v
1891/1892 – 1913/1914	23	666	75	0,11	179 (27)	28	0,16	493 (73)	47	0,10
1914/1915 – 1929/1930	16	699	99	0,13	205 (29)	39	0,19	474 (68)	49	0,10
1930/1931 – 1945/1946	16	628	64	0,10	160 (25)	25	0,16	499 (79)	36	0,07
1946/1947 – 1977/1978	32	646	72	0,11	185 (29)	27	0,15	469 (73)	48	0,10
1978/1979 – 2001/2002	24	696	85	0,12	210 (30)	29	0,14	463 (67)	52	0,11
2002/2003 – 2020/2021	19	662	61	0,10	191 (29)	21	0,11	472 (71)	33	0,07

Среднегодовое значения атмосферных осадков в указанных интервалах составили соответственно 699 и 696 мм/год при климатической норме 665 мм/год. Эти же интервалы характеризуются повышенной водностью и, соответственно, среднегодовым значением стока 205 мм/год (279 км³/год) и 210 мм/год (286 км³/год) при норме речного стока в базовый период 189 мм/год (257 км³/год). Анализ величины испарения этих интервалов показывает, что испарения колеблются близко к климатической норме, которая составляет 476 мм/год. Как хорошо видно на рисунке, изменение бассейновых влагозапасов в первом интервале имеет симметричный характер, т.е. наполнение и сработка примерно одинаковые. Во втором интервале преимущество имеет процесс наполнения бассейновых влагозапасов. Далее, в многолетних колебаниях годовых объёмов реки Волги (табл. 2 и рисунок) выделяется длительный маловодный период сниженного годового стока. При этом выделяются два интервала 1930/1931 – 1945/1946 гг. — катастрофически маловодный, снижение стока до 160 мм/год (218 км³/год); и второй интервал 1946/1947 – 1977/1978 гг. — умеренно маловодный, снижение стока до 185 мм/год (252 км³/год) при климатической норме 257 км³/год). Эти интервалы также характеризуются пониженными осадками: первый интервал — 628 мм/год, второй — 646 мм/год при климатической норме 665 мм/год. Эти интервалы, характеризующиеся спадом атмосферных осадков и речного стока в бассейне реки Волги, сопровождаются увеличением суммарного испарения, причём в первом интервале оно очень высокое и составляет 499 мм/год, во втором — 469 мм/год, приближается к климатической норме (476 мм/год). Таким образом, рассмотренный нами период 1891/1892 – 2020/2021 гг. включает в себя полный цикл колебаний годовых элементов водного баланса бассейна реки Волги.

Обсуждение. Началу длительного рассматриваемого периода с 1891 по 2021 гг. характерно повышение атмосферных осадков и речного стока, затем их длительное снижение, а затем опять период увеличения этих элементов водного баланса. В отличие от стока и осадков, суммарному испарению свойственна тенденция к снижению. Анализ распределения атмосферных осадков на формирование речного стока, суммарного испарения и бассейновых влагозапасов показывает, что периоды 1914/1915 – 1929/1930 или 1978/1979 – 2001/2002 гг. характеризуются экстремальными повышенными осадками. Осадки указанных периодов расходуются на речной сток соответственно 29 и 30 %, а на испарение — 68 и 67 % (табл. 2.). При пониженных осадках в периоде 1930/1931 – 1945/1946 гг. на сток затрачивается 25 %, а на испарение — 79 % атмосферных осадков. Проведённый анализ межгодовой изменчивости элементов водного баланса бассейна реки Волги позволяет сделать вывод о том, что наиболее явной причиной формирования маловодья в бассейне реки Волги является такое соотношение тепла и влаги, когда пониженные атмосферные осадки совпадают с повышенными значениями суммарного испарения с поверхности водосбора.

Выводы

Разработанная методика позволила сгенерировать длительные временные ряды гидрометеорологической информации для оценки элементов водного баланса речного бассейна. Информация может использоваться в процессе исследования вероятностных климатических трендов в колебаниях элементов водного баланса. Многолетние ряды стока незаменимы при выполнении водохозяйственных и водно-энергетических расчетов в режиме имитационного моделирования. Кроме того, используя

предложенную методику, появилась возможность объяснить причины изменения элементов водного баланса бассейна реки Волги в зоне формирования у города Волгограда.

Соблюдение этических норм

Конфликт интересов: автор 1 участвовал в концептуализации, методологии, программном обеспечении, обработке данных. Автор 2 осуществлял научное руководство, участвовал в постановке задачи исследований, редактировании рукописи. От имени всех авторов автор-корреспондент заявляет, что конфликта интересов нет.

Финансирование: авторы не получали поддержки от какой-либо организации в отношении представленной работы. Финансирование для проведения данного исследования получено не было.

Нефинансовые интересы: авторы заявляют, что у них нет финансовых интересов.

Нефинансовые интересы: отсутствуют.

Список литературы

1. *Исмайлов Г. Х., Федоров В. М.* Межгодовая изменчивость и взаимосвязь элементов водного баланса бассейна р. Волги. // Водные ресурсы. 2008. Т. 35. № 3. С. 259 – 276.
2. *Фролов А. В.* Оценка статистических характеристик многолетних колебаний испарения с крупных речных водосборов // Доклады Академии наук. 2014. Т. 458. № 3. С. 345 – 348.
3. *Исмайлова И. Г.* Моделирование элементов водного баланса бассейна р. Волги для создания информационно-аналитической гидрометеорологической базы данных. Фундаментальные и прикладные аспекты развития современной науки / Сборник трудов по материалам XII Международного конкурса научно-исследовательских работ (27 марта 2023 г., г. Уфа). — Уфа: Изд. НИЦ Вестник науки, 2023. С. 29 – 38
4. *Крицкий С. Н., Менкель М. Ф.* Гидрологические основы управления речным стоком. — М.: Наука, 1981. — 255 с.
5. *Фролов А. В., Выручалкина Т. Ю., Соломонова И. В.* Моделирование негауссова векторного процесса в приложении к гидрологии // Водные ресурсы. 2014. Т. 41. № 6. С. 559 – 564.
6. *Мезенцев В. С., Карнацевич И. В.* Увлажненность Западно-Сибирской равнины. — Л: Гидрометеиздат, 1969. — 168 с.
7. *Huaxia Yao, Irena F. Creed* Determining spatially — distributed annual water balances for ungauged locations on Shikoku Island, Japan: a comparison of two interpolators // Hydrological Sciences Journal, 50(2), April 2005. P. 245 – 263.
8. *Научно-прикладной справочник.* Многолетние изменения элементов водного баланса на воднобалансовых и болотных станциях // Под ред. М. Л. Маркова. — Санкт-Петербург, 2021. — 202 с.
9. *Григорьев В. Ю., Фролова Н. Л., Джамалов Р. Г.* Изменение водного баланса крупных речных бассейнов Европейской части России // Водное хозяйство России. 2018. № 4. С. 36 – 47.