

Гидравлика и инженерная гидрология

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2024-2-69-78>

УДК 556.51:631.432.4:551.5



ИССЛЕДОВАНИЕ МНОГОЛЕТНЕЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ ВОДНОГО БАЛАНСА РЕЧНОГО БАСЕЙНА В СОВРЕМЕННОМ КЛИМАТЕ

И.Г. Исмайлова

Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49, Россия

Аннотация. Рассмотрена оценка трансформации элементов водного баланса бассейна Волги в зоне формирования у г. Волгограда за весь период XX в. и в начале первой половины XXI в. Проведенный ретроспективный сопряженный анализ элементов водного баланса (далее – ЭВБ) бассейна р. Волги основан на использовании достаточно длительных гидрометеорологических массивов исходных данных наблюдений, охватывающих период 1891/1892-2020/2021 гг. Организованы два различной длительности ряда, в которых отражены значения годовых и сезонных осадков, речного стока, испарения, изменения бассейновых влагозапасов и колебания температуры воздуха холодного и теплого периодов и года в целом. Установлено, что до 1935 г. в многолетнем ходе стока бассейна р. Волги основополагающими факторами являются природные факторы, которые выражаются в характере увлажнения территории, режиме общего испарения с ее поверхности и изменении влагозапасов в почвогрунтах. С 1935 г. на изменение уровня воды в Волге большое влияние оказала деятельность человека, особенно режимы работы Волжско-Камского каскада гидроузлов. Однако антропогенные влияния не затрагивают формирование боковых притоков, которые контролируются 11 водохранилищами Волжско-Камского каскада. Поэтому для ретроспективного сопряженного анализа ЭВБ бассейна р. Волги были использованы 2 условно-естественных временных ряда разной длительности.

Ключевые слова: нестационарность, разностная интегральная кривая, речной водосбор, водный баланс, водохранилища, поверхностный сток, сопряженный анализ, модель климата, приземной слой воздуха, климатическая система, элементы водного баланса

Формат цитирования: Исмайлова И.Г. Исследование многолетней изменчивости элементов водного баланса речного бассейна в современном климате // Природообустройство. 2024. № 2. С. 69-78. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2024-2-69-78>

Original article

INVESTIGATION OF THE LONG-TERM VARIABILITY OF THE ELEMENTS OF THE WATER BALANCE OF THE RIVER BASIN IN THE MODERN CLIMATE

I.G. Ismailova

Russian State Agrarian University – MAA named after C.A. Timiryazev, 127434, Moscow, Timiryazevskaya ul.49, Russia

Abstract. The assessment of changes in the elements of the water balance of the Volga River basin in the formation zone near Volgograd for the entire period of the twentieth century and at the beginning of the first half of the XXI century is considered. The conducted retrospective conjugate analysis of the EWB of the Volga River basin is based on the use of sufficiently long hydro meteorological arrays of initial observation data covering the period 1891/1892-2020/2021. Two time series of annual and seasonal values of atmospheric precipitation, river runoff, total evaporation of land, changes in basin moisture reserves and changes in surface air temperature of the cold and warm periods and the year as a whole are organized. It was established that until 1935, in the long-term course of the runoff of the Volga River basin, natural factors were of decisive importance, i.e. the nature of the humidification

of the territory, the regime of total evaporation from its surface and the change in moisture reserves in the soil-soils. Since 1935, the water content of the river has changed. Human economic activity began to have a significant impact on the Volga, especially the operating modes of the Volga-Kama cascade of waterworks. However, anthropogenic influences do not affect the formation of lateral tributaries, which are controlled by 11 reservoirs of the Volga-Kama cascade. Therefore, for a retrospective conjugate analysis of the EWB of the Volga River basin, two conditionally natural time series of different durations were used.

Keywords: unsteadiness, difference integral curve, river catchment, water balance, reservoirs, surface runoff, conjugate analysis, climate model, surface air layer, climate system, elements of water balance

Format of citation: Ismaiylola I.G. Investigation of the long-term variability of the elements of the water balance of the river basin in the modern climate // Prirodoobustroystvo. 2024. No. 2. P. 69-78. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2024-2-69-78>

Введение. Наличие в колебаниях речного стока тренда, обусловленного антропогенным воздействием на речной сток, а также выдвигаемые гипотезы о возможных изменениях глобального и регионального климата [1-3] ставят под сомнение принятие концепции о стационарности многолетних колебаний речного стока. Возникает необходимость оценки степени изменчивости элементов водного баланса (ЭВБ) речного бассейна за длительный период в современном климате и климате будущего. В работах [4-6] обнаружена недостаточность подхода к установлению стационарности формирования речного стока в течение длительного периода. В целях решения проблемы управления водными ресурсами необходимо подвергнуть сомнению представления, которые касаются стационарности режима вод речных бассейнов. Эта ситуация обусловлена изменением ЭВБ и режима вод речных бассейнов как ввиду естественных отклонений гидрометеорологических условий в результате глобального и регионального изменения климата, так и в результате воздействия на речные бассейны антропогенных факторов.

Цель исследований: выявление изменений, происходящих в многолетнем колебании речного стока бассейна р. Волги в зоне формирования у г. Волгограда на фоне возможных изменений других элементов водного баланса (таких, как осадки, общее испарение и изменение бассейновых влагозапасов) для разработки комплексных мероприятий по минимизации негативных последствий изменения глобального и регионального климата в экономике региона и в окружающей природной среде.

Материалы и методы исследований. Для оценки трансформации водных ресурсов бассейна р. Волги в современном климате необходимо прежде всего провести сравнительный анализ элементов водного баланса: атмосферные осадки (Р), суммарное испарение (Е), речной сток (R) и изменение бассейновых влагозапасов ($\pm \Delta V$). Кроме этих ЭВБ, для сопряженного

анализа были использованы такие показатели, как температура приземного слоя (Т), эффективные осадки, которые участвуют в формировании речного стока (Р-Е). Необходимо иметь достаточно длительные временные ряды для вышеуказанных гидрометеорологических характеристик створов исследуемого речного бассейна.

Благодаря существующим опорным гидрологическим и метеорологическим станциям в нашем распоряжении имеются длительные временные ряды атмосферных осадков и речного стока для условий современного климата. При этом нами были использованы среднееголетние значения годовых осадков (по данным Мирового центра данных МЦД (meteo.ru) – Российский гидрометеорологический портал) за период 1891/1892-2020/2021 гг., $n = 130$ лет, и две версии временного ряда притока речных вод бассейна р. Волги по данным ОАО «Институт Гидропроект»: наблюдаемая – период 1881/1882-2000/2001 гг., $n = 120$ лет; условно-естественная (восстановленная) за период 1881/1882-2020/2021 гг., $n = 140$ лет.

Кроме того, в условиях современного климата для сопряженного анализа используется условно-естественный сток р. Волги в зоне формирования у г. Волгограда за период 1914/1915-2020/2021 гг., $n = 107$ лет. Для сопряженного анализа также использована температура приземного слоя воздуха за период 1901/1902-2020/2021 гг., $n = 120$ лет. Естественно, возникает вопрос о получении длительных временных рядов суммарного испарения и бассейновых влагозапасов бассейна р. Волги в зоне формирования у г. Волгограда. С этой целью для определения суммарного испарения и бассейновых влагозапасов была использована методика, приведенная в работах [7-9].

Установлено, что при учете закономерностей динамики ЭВБ речной бассейн рассматривается, с одной стороны, как единый индикативный объект, а с другой стороны – как объект, в котором существует множество разных природных

и антропогенно преобразованных ландшафтов, каждый из которых привносит свой вклад в формирование ЭВБ. Под воздействием разных условий увлажнения и нагрузок на ландшафты происходит изменение структуры водного баланса территории речного бассейна. На одинаковые осадки возможны всевозможные реакции речных водосборов, зависящие от разных сочетаний факторов – как климатических, так и неклиматических. В соответствии с этим выявляются, анализируются и обобщаются закономерности межгодовой и сезонной изменчивости ЭВБ речного бассейна в многолетнем разрезе. Методической основой для такого анализа и обобщения являются методы математической статистики и вероятностного анализа временных рядов, сформированных гидрометеорологическими наблюдениями.

Процесс формирования ЭВБ, согласно распространенному мнению, имеет вероятностный характер, а сами показатели воспринимаются как стохастический процесс. Процесс, описываемый в количественном выражении как стохастический, характеризуется случайной функцией, зависящей от времени. Это означает, что значения данной функции в любой момент времени будут являться произвольными величинами. Отсюда последовательность показателей ЭВБ, приобретенных в одинаковых временных промежутках, является динамическим или временным

рядом, а вероятностная модель, которая ему соответствует – случайным процессом с дискретным временем. Этот процесс обладает определенными характеристиками, среди которых выделяются математическое ожидание (среднепогодное значение), дисперсия или среднеквадратическое отклонение, взаимная корреляционная и автокорреляционная функции.

Результаты и их обсуждение. Гидрологический цикл неразрывно связан с изменениями в температуре и радиационном балансе атмосферы. Поэтому для выявления возможных тенденций в колебаниях составляющих водного баланса и определяющих их факторов за инструментальный период наблюдений необходимо прежде всего провести анализ динамики временного ряда температуры приземного воздуха водосбора бассейна р. Волги.

Проанализированы среднегодовая температура воздуха за холодный и теплый периоды бассейна р. Волги в зоне формирования стока у г. Волгограда за период 1901/1902-2020/2021 гг. С учетом большой протяженности водосбора бассейна р. Волги проанализированы также изменения температуры приземного воздуха для Верхней Волги, Средней Волги, Нижней Волги, и отдельно – р. Камы.

В таблице 1 приведены результаты анализа: начиная с 1975/1976 г., наблюдается

Таблица 1. Исследование температуры приземного воздуха среднегодового, холодного и теплого периодов, °С, бассейна р. Волги в зоне формирования стока за период 1901/1902-2020/2021 гг. (климатический год – XI-III, холодный период – XI-III, теплый период – IV-X)

Table 1. Investigation of the surface air temperature of the average annual, cold and warm period (°C) of the Volga River basin in the zone of the flow formation for the period of 1901/1902-2020/2021 years (climate year XI-III, cold period XI-III, warm period IV-X)

№ п/п	Водосборы Watercatchments	Периоды Periods	Температура / Temperature		Приращение °С (в %-ах) Increase °C (in %)
			Период / Period 1901/1902/1975/1976	Период / Period 1976/1977/2020/2021	
1	Р. Волга – зона формирования у г. Волгограда <i>Volga River – formation zone near Volgograd</i>	Год / Year	3,2	4,2	1,0 (31)
		Холодный / Cold	–8,9	–7,2	–1,7 (20)
		Теплый / Warm	11,8	12,4	0,6 (5)
2	Верхняя Волга <i>Upper Volga</i>	Год / Year	3,5	4,4	0,9 (26)
		Холодный / Cold	–7,1	–5,7	–1,4 (20)
		Теплый / Warm	11,1	11,6	0,5 (5)
3	Средняя Волга <i>Middle Volga</i>	Год / Year	3,4	4,2	0,8 (24)
		Холодный / Cold	–8,8	–7,5	–1,3 (15)
		Теплый / Warm	12,1	12,6	0,5 (4)
4	Нижняя Волга <i>Lower Volga</i>	Год / Year	4,7	5,8	1,1 (24)
		Холодный / Cold	–8,9	–7,1	–1,8 (20)
		Теплый / Warm	14,5	15,1	0,6 (4)
5	Р. Кама <i>Kama River</i>	Год / Year	1,4	2,4	1,0 (71)
		Холодный / Cold	–11,6	–9,8	–1,8 (16)
		Теплый / Warm	10,7	11,1	0,4 (4)

тенденция в сторону повышения средней многолетней годовой (нормы) температуры приземного воздуха в бассейне р. Волги в зоне формирования стока (приращение составляет $1,0^{\circ}\text{C}$). Эти изменения особенно заметны в холодный период года (приращение $-1,7^{\circ}\text{C}$). В теплый период года, наоборот, наблюдается тенденция умеренного повышения нормы температуры приземного воздуха (приращение $-0,6^{\circ}\text{C}$).

Сравнение изменений нормы температуры приземного воздуха по выделенным районам бассейна Волги с бассейном р. Волги в целом свидетельствует о наличии тенденций синхронности в многолетнем колебании температуры приземного воздуха. Как следует из анализа (табл. 1) динамики температурного режима водосбора бассейна р. Волги, потепление этой

климатической системы в последнюю четверть XX в. является неоспоримым. Повышение температуры приземного воздуха бассейна р. Волги подтверждается и глобальным изменением средней температуры Земли и отдельных ее континентов и регионов [1, 2, 10, 11]. По данным этих источников, начиная с 70-х гг., климат стал значительно теплее. Десятилетие 1990-х гг. стало самым теплым за весь период наблюдений. Исследователям представляется, что основной предпосылкой такого изменения климата является антропогенная эмиссия парниковых газов и аэрозолей, которая будет увеличиваться в течение нашего века.

На рисунках 1 и 2 представлена изменчивость сезонных и годовых элементов водного баланса за длительный период бассейна Волги в зоне

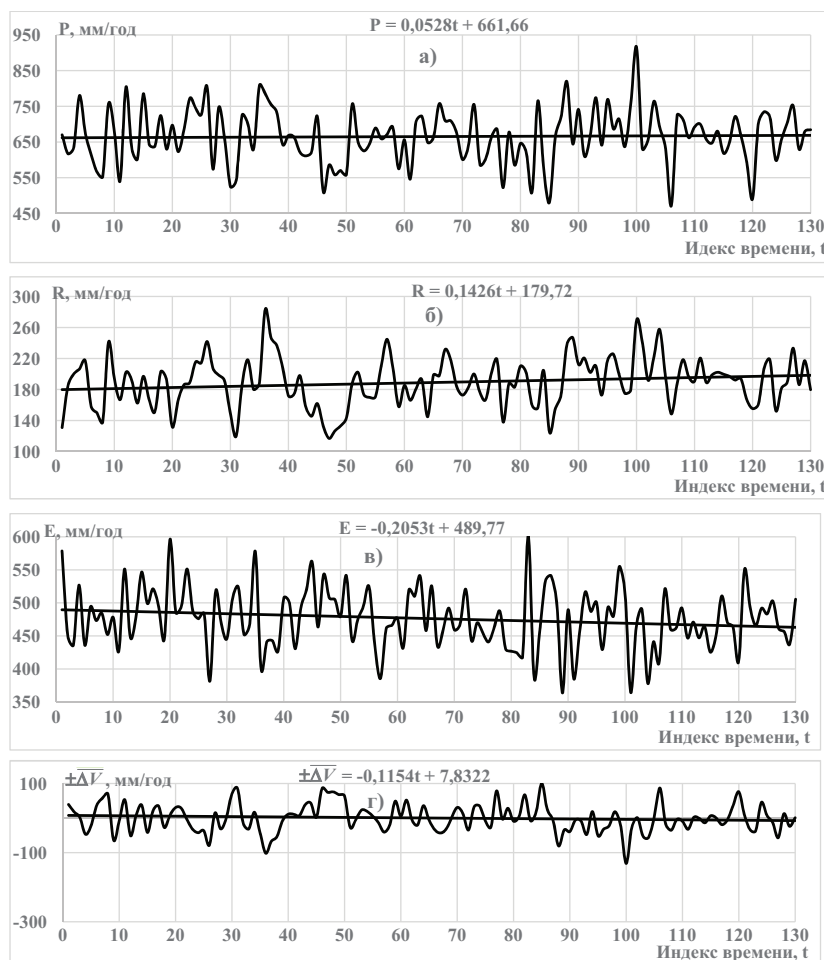


Рис. 1. Изменчивость ЭВБ за длительный период (год) бассейна р. Волги в зоне формирования, 1891/1892-2020/2021:

а) осадки (P); б) речной сток (R); в) общее испарение (E); г) бассейновые влаготазасы ($\pm\Delta V$).

Для условий современного климата (базовый период):

$\bar{P} = 665$ мм/год; $R = 189$ мм/год ($257 \text{ км}^3/\text{год}$); $E = 476$ мм/год; $\pm\Delta V = 0,0$ мм/год

Fig. 1. WEB variability for the long-term period of the Volga River basin in the formation zone for 1891/1892-2020/2021: a) precipitation (P); b) river flow R; c) total evaporation E; d) basin moisture reserves ($\pm\Delta V$).

For the conditions of the modern climate (base period): $\bar{P} = 665$ mm/year;

$R = 189$ mm/year ($257 \text{ km}^3/\text{year}$); $E = 476$ mm/year; $\pm\Delta V = 0,0$ mm/year

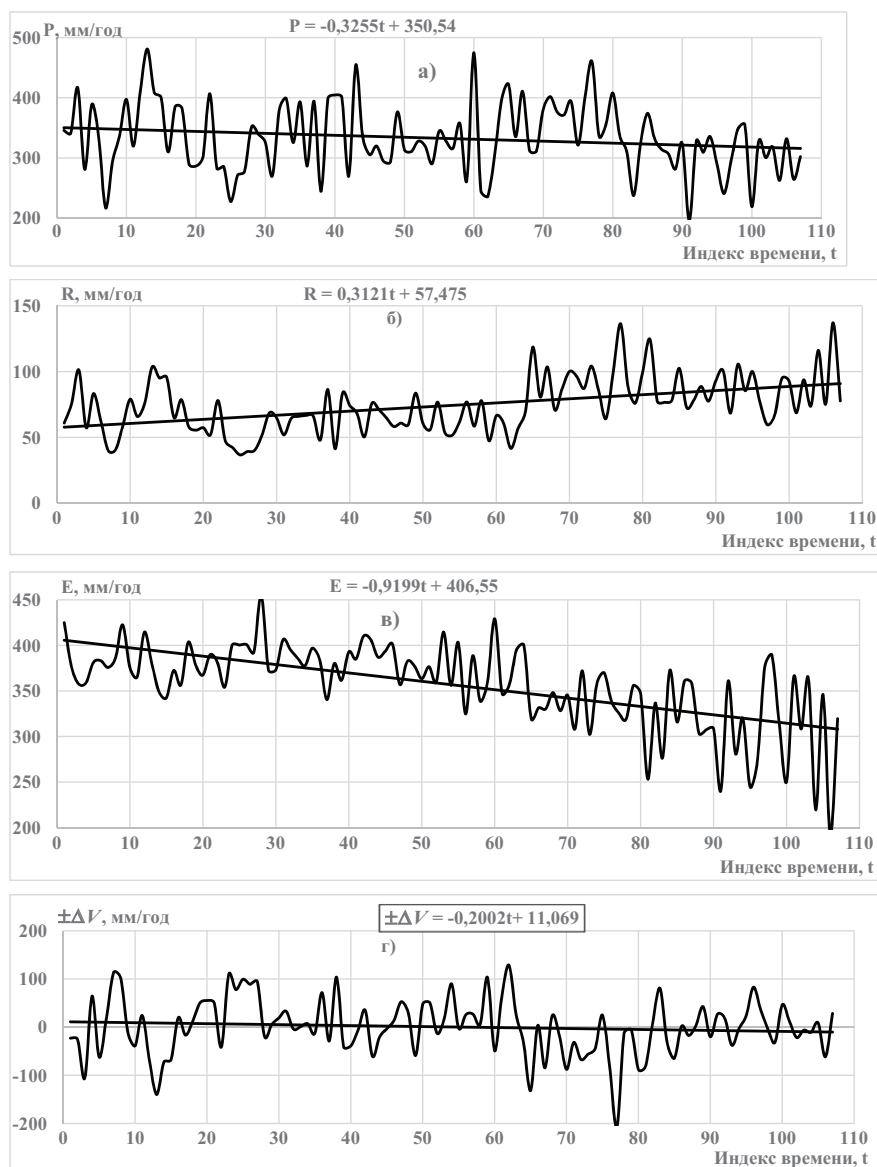


Рис. 2. Изменчивость ЭВБ за длительный период (межень бассейна р. Волги) в зоне формирования за период 1914/1915-2020/2021 гг.:

а) осадки (P); б) речной сток (R); в) общее испарение (E); г) бассейновые влаготпасы ($\pm\Delta V$).

Для условий современного климата (базовый период 1914/1915-2020/2021 гг.):

$P = 333$ мм/год; $R = 74$ мм/год ($100 \text{ км}^3/\text{г.}$); $E = 357$ мм/год; $\pm\Delta V = 0,0$

Fig. 2. WEB variability for the long-term period of the low water of the Volga River basin in the formation zone for the period of 1914/1915-2020/2021:

a) precipitation (P); b) river flow R; c) total evaporation E; d) basin moisture reserves; b) ($\pm\Delta V$).

For the conditions of the modern climate (base period 1914/1915-2020/2021): $P = 333$ mm/year;

$R = 74$ mm/year ($1007 \text{ km}^3/\text{year}$); $E = 357$ mm/year; $\pm\Delta V = 0,0$ mm/year

формирования у г. Волгограда. По данным рисунков можно наблюдать присущее гидрометеорологическим характеристикам чередование аномальных лет и их групп в изменчивости сезонных и годовых ЭВБ; в чередовании аномальных лет и их групп – по осадкам с увеличивающейся и уменьшающейся степенью увлажнения территории, по речному стоку многоводных и маловодных лет и т.п. В изменчивости осадков года и межени наблюдается синхронный характер и тенденция их увеличения. В начале XX в., с 1914/1915

до 1929/1930 гг. (первый интервал), последней четверти XX в., с 1978/1979 по 2020/2021 гг. (второй интервал), наблюдается повышение значения атмосферных осадков. Среднемноголетние величины атмосферных осадков в указанные интервалы составляют 669 и 696 мм/год при климатической норме 665 мм/год. Эти же интервалы характеризуются повышенной водностью. Среднемноголетний речной сток составил 205 и 210 мм/год при норме базового периода 189 мм/год.

В изменчивости за длительный период годовых объемов стока Волги фиксируются два маловодных периода: первый – с 1930/1931 по 1945/1946 гг. (критически маловодный), в котором значение среднееголетнего стока составило 160 мм/год (218 км³/год); второй – с 1946/1947 по 1977/1978 гг. (маловодный), когда значение среднееголетнего стока составило 185 мм/год (252 км³/год) при норме стока базового периода 257 км³/год. Эти интервалы сопровождаются спадом атмосферных осадков (628 и 646 мм/год при норме 665 мм/год) и ростом общего испарения (499 и 469 мм/год при норме базового периода 476 мм/год).

Анализ многолетних колебаний годового суммарного испарения за рассматриваемый базовый период (1891/1892-2020/2021 гг., $n = 130$ лет) показывает, что они колеблются близко к климатической норме, которая составляет 476 мм/год. Однако если рассматривать период межени, обнаруживается, что для него свойственна тенденция снижения (рис. 2в).

В процессе изменения бассейновых влагозапасов наблюдается следующая закономерность (рис. 1г, 2г). При половодье происходит аккумуляция, а во время межени – сработка. Это приводит к тому, что годовой баланс стремится к нулю. В начале XX в. бассейновые влагозапасы наращиваются от 30 мм/год (41 км³/год) до 163 мм/год (222 км³/год) и от 26 мм/год (35 км³/год) до 211 мм/год (289 км³/год) в последней четверти XX в. Следовательно, запасы воды, аккумулированные в половодье, участвуют в создании добавочного поверхностного стока и общего испарения в межень, тем самым увеличивая уровень естественной водообеспеченности (увлажненности) территории бассейна р. Волги.

Для оценки и прогноза суммарного притока бассейна р. Волги в зоне формирования у г. Волгограда были проанализированы временные ряды значений речного стока, атмосферных осадков и общего испарения (как сезонных, так и годовых) и установлено наличие тенденции, цикличности и однородности (неоднородности). Нестационарность процесса выражается в тенденциях, которые являются закономерными и отражаются на постоянном возрастании или снижении ЭВБ, либо амплитуды колебаний относительно их среднего значения. С помощью параметрических и непараметрических критериев (таких, как критерий Спирмена, И.И. Поляка и коэффициент корреляции между значениями ряда и порядковыми номерами его членов) можно обнаружить наличие тренда [5, 12].

В целях оценки статистической значимости линейного тренда исследуемых ЭВБ был использован метод, который основан на применении коэффициента корреляции и учитывает взаимосвязи показателей временного ряда (x_i) и их порядковых номеров (i). Определим коэффициент корреляции:

$$r_{x,i} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(i - \bar{i})}{(n-1)\sigma_x \sigma_i}, \quad (1)$$

где x_i – показатель элемента водного баланса; $\bar{x}$ – среднееголетнее значение элемента водного баланса; i – порядковый номер члена ряда; $\bar{i}$ – среднеарифметическое значение порядковых номеров членов ряда; σ_x, σ_i – среднеквадратические отклонения; n – длина ряда.

В случае $r_{x,i} \leq 0,3$ статистическая связь между двумя рядами считается слабой; если $0,3 \leq r_{x,i} \leq 0,7$ – средней; в случае $r_{x,i} \geq 0,7$ – высокая степень статистической связи. Среднеквадратическое отклонение коэффициента корреляции находится по формуле:

$$\sigma_{r_{x,i}} = \frac{1 - r_{x,i}^2}{\sqrt{n-1}}. \quad (2)$$

Коэффициент достоверности:

$$K_D = \frac{r_{x,i}}{\sigma_{r_{x,i}}}. \quad (3)$$

В случае $r_{x,i} \geq 2\sigma_{r_{x,i}}$ и $K_D \geq 2$, если значение критерия находится в пределах 5% ($\alpha = 5\%$), можно говорить о том, что коэффициент корреляции достоверен, линейный тренд исследуемых ЭВБ статистически значим и отличается от нуля.

В таблице 3 представлены результаты расчетов по установлению наличия тренда ЭВБ бассейна р. Волги в зоне формирования до г. Волгограда. Результаты данных таблицы показывают, что при 5%-ном уровне значимости в динамике атмосферных осадков, как в период половодья и межени, так и за год в целом, сколько-нибудь явные тенденции не проявляются и характер колебаний скорее свидетельствует о стационарности рядов атмосферных осадков. Аналогичные условия стационарности обнаруживаются и в колебаниях бассейновых влагозапасов водосбора бассейна р. Волги. Во временных рядах стока половодья, межени и годового стока выявлена нестационарность.

Таким образом, линейный тренд, обнаруженный в многолетних колебаниях годовых и сезонных величинах речного стока, суммарного испарения и температуры приземного воздуха, является статистически значимым (с 95%-ным уровнем надежности) и отличается от нуля.

Таблица 3. Значения уравнений зависимости элементов водного баланса от времени (период 1914/1915-2020/2021 гг., n = 107 лет)

Table 3. Values of equations of dependence of water balance elements on time (period 1914/1915-2020/2021, n = 107 years)

ЭВБ* EWB	Уравнение тренда Trend Equation	Среднее, мм/год Average mm/year	Параметры для оценки наличия тенденций (по коэффициентам корреляции и коэффициентам достоверности) Parameters for assessing trends availability (correlation coefficients and confidence coefficients)				
			R	σ_R	$2\sigma_R$	$K_D \geq 2$	Значимость тренда / Trend value
Период весеннего половодья / Periods of spring floods							
PB	$PB = 0,1084t + 331,82$	326	-0,07	0,10	0,20	0,7	Не значим / Not significant
RB	$RB = 0,1357t + 123,09$	116	-0,20	0,08	0,16	2,5	Значим / Significant
EB	$EB = 0,1093t + 106,31$	110	0,21	0,09	0,18	2,3	Значим / Significant
±ΔVB	$\pm\Delta VB = 0,082t - 102,41$	-98	0,07	0,10	0,20	0,7	Не значим / Not significant
Период межени (летне-осенняя и зимняя) / Periods of low water (summer-autumn and winter)							
PM	$PM = 0,3255t + 350,54$	333	-0,17	0,10	0,20	1,7	Не значим / Not significant
RM	$RM = 0,3121t + 57,48$	75	0,45	0,09	0,18	6,0	Значим / Significant
EM	$EM = -0,9199t + 406,55$	360	-0,60	0,08	0,16	11	Значим / Significant
±ΔVM	$\pm\Delta VM = -0,2002t + 11,07$	0,0	-0,12	0,11	0,22	1,0	Не значим / Not significant
Годовой период / Annual period							
РГ	$РГ = -0,4339t + 682,36$	660	-0,18	0,10	0,20	1,6	Не значим / Not significant
РГ	$РГ = 0,1764t + 180,57$	192	0,20	0,09	0,18	2,3	Значим Significant
ЕГ	$ЕГ = 0,8106t + 512,86$	470	-0,55	0,09	0,18	8,0	Значим Significant
±ΔVГ	$\pm\Delta VГ = -0,2002t + 11,07$	0,0	-0,12	0,11	0,22	1,0	Не значим / Not significan
ТГ, °C	$ТГ = 0,0157t + 2,6185$	3,6	0,38	0,09	0,18	3,1	Значим / Significant
ТХ, °C	$ТХ = 0,0245t - 9,756$	-8,5	0,34	0,10	0,20	3,8	Значим / Significant
ТТ, °C	$ТТ = 0,0094t + 11,457$	13,0	0,26	0,10	0,20	4,4	Значим / Significant

*РГ – годовые осадки, РВ – осадки половодья, РМ – осадки межени; РГ – годовой речной сток, РВ – речной сток половодья, РМ – речной сток межени; ЕГ – годовое общее испарение, ЕВ – испарение половодья, ЕМ – испарение межени; $\pm\Delta VT$ – трансформация влагозапасов за год, $\pm\Delta VB$ – трансформация влагозапасов половодья, $\pm\Delta VM$ – трансформация влагозапасов межени; ТГ, °С, – годовая температура приземного слоя, ТХ, °С, – температура приземного воздуха холодного периода, ТТ, °С, – температура приземного воздуха теплого периода.

РГ – annual precipitation, РВ – precipitation of flooding, РМ – precipitation of low water; РГ – annual river flow, РВ – river flow of flooding, РМ – river flow of low water; ЕГ – annual total evaporation, ЕВ – evaporation of flooding, ЕМ – evaporation of low water; ЕГ – annual total evaporation, ЕВ – evaporation of flooding, ЕМ – evaporation of low water; $\pm\Delta VT$ – transformation of moisture reserves for a year, $\pm\Delta VB$ – transformation of moisture reserves of flooding, $\pm\Delta VM$ – transformation of moisture reserves of low water; ТГ, °С, – annual temperature of surface layer, ТХ, °С, – temperature of surface air of cold period, ТТ, °С, – temperature of surface air of warm period.

Исходя из данного факта, можно сделать вывод о том, что в течение многих лет в колебаниях таких водных элементов, как речной сток и общее испарение бассейна р. Волги, имеет место положительный, статистически значимый тренд. Это означает, что исследуемые ряды наблюдений не могут быть отнесены к стационарным.

Цикличность ЭВБ является следующим этапом исследования нестационарности ЭВБ. В исследуемом базовом периоде 1891/1892-2020/2021 гг. в многолетних колебаниях атмосферных осадков обнаруживаются два полных, достаточно длительных цикла, охватывающие 1911/1912-1940/1941 гг., n = 30 лет, и 1960/1961-1990/1991 гг., n = 30 лет. В колебаниях годовых атмосферных осадков выделяются два периода, в течение которых атмосферные осадки были ниже их базовых среднеемноголетних

величин (665 мм/год). Первый из этих периодов охватывает 21 г. (с 1891/1892 по 1911/1912 гг.) со средними атмосферными осадками 660 мм/год. Второй период продолжался в течение достаточно длительного периода (с 1929/1930 по 1975/1976 гг., n = 47 лет) со средними атмосферными осадками 638 мм/год (на 4,1% меньше базовых среднеемноголетних). Внутри этого периода имел место 12-летний подпериод с достаточно пониженными атмосферными осадками: с 1929/1930 по 1940/1941 гг. – со средними осадками 611 мм/год (на 8,1% меньше базовых). Одновременно можно выделить два периода с повышенными атмосферными осадками: 1912/1913-1928/1929 гг., n = 17 лет; 1976/1977-1990/1991 гг., n = 15 лет. Средние атмосферные осадки первого периода составляют 701 мм/год (на 5,4% выше базовых среднеемноголетних), а осадки второго

периода – 717 мм/год (на 7,7% выше базовых среднемноголетних). В последнее тридцатилетие, с 1991/1992 по 2020/2021 гг., годовые атмосферные осадки колеблются вокруг базового среднемноголетнего, и средние атмосферные осадки этого периода составляют 664 мм/год.

Анализ разностной интегральной кривой годового стока р. Волги в зоне формирования до г. Волгограда позволяет в пределах рассматриваемого 130-летнего периода выделить два цикла полных колебаний водности, включающих в себя многоводную и маловодную ветви. Первый цикл колебания по водности – с 1881/1882 по 1929/1930 гг., $n = 39$ лет; второй цикл – с 1930/1931 по 2004/2005 гг., $n = 75$ лет. В 2005/2006 г., по всей видимости, начался третий цикл. Отклонение водности отдельных фаз от базового является таким: если в первом цикле сток многоводной его фазы превышал базовый среднемноголетний на 7,4%, то во втором цикле – на 10,6%; сток маловодной фазы первого цикла ниже базового среднемноголетнего был на 5,3%, а во втором цикле – на 6,3%. Среднемноголетний сток базового периода 1891/1892-2020/2021 гг., $n = 130$ лет, составляет 189 мм/год ($257 \text{ км}^3/\text{год}$).

Выделяется достаточно продолжительный цикл, включающий в себя длительный маловодный период: с 1930/1931 по 1977/1978 гг., $n = 48$ лет, со средним стоком 177 мм/год ($240 \text{ км}^3/\text{год}$) (на 6,6% меньше базового среднемноголетнего). С 1978/1979 по 2004/2005 гг., $n = 27$ лет, в бассейне р. Волги вновь наступила фаза роста водности со средним стоком 209 мм/год ($284 \text{ км}^3/\text{год}$) – на 10,6% выше базового среднемноголетнего. С 2005/2006 по 2020/2021 гг., $n = 15$ лет, в Волжском бассейне наблюдается снижение средней водности до 190 мм/год ($258 \text{ км}^3/\text{год}$), то есть рассматриваемый последний 15-летний средний сток Волжского бассейна снизился до базового среднемноголетнего стока.

Можно предположить, что с 2005/2006 г. начался третий цикл, и мы имеем дело с одним из длиннопериодических циклов изменения стока р. Волги в зоне формирования до г. Волгограда, причем, по-видимому, сначала он будет сопровождаться снижением притока речных вод в зоне формирования, а затем – его повышением. Если это действительно так, то можно выдвинуть гипотезу о том, что в 2005/2006 г. началась ветвь спада этого длиннопериодического цикла в колебаниях стока р. Волги.

Аналогичный цикл выделяется в динамике суммарного испарения с поверхности суши водосборов бассейна р. Волги. В то же время

он является зеркальным отражением циклов речной воды, так как фазы уменьшения речного стока совпадают с фазами увеличения суммарного испарения, а фазам роста речного стока соответствуют фазы снижения суммарного испарения. Следовательно, в отличие от атмосферных осадков и речного стока в динамике суммарного испарения наблюдаются противофазные направления. Такой же цикл повторяется и в динамике трансформации бассейновых влагозапасов. Сработка бассейновых влагозапасов происходит при спаде осадков и речного стока, а накопление – при росте осадков и речного стока. При этом накопление происходит в период половодья или паводков, а сработка – в период межени, в результате невязка годового баланса уменьшается и в идеале стремится к нулю.

В целом анализ разностных интегральных кривых ЭВБ бассейна р. Волги со всей очевидностью показывает, что снижение атмосферных осадков в начале и середине XX в. вызвало снижение притока речных вод в зоне формирования у г. Волгограда, и в целом – уменьшение притока речных вод в Каспийское море. Связь изменений уровня Каспийского моря проявляется через взаимосвязь притока речных вод в море.

Существует несколько основных допущений, которые при прогнозировании ЭВБ речного бассейна необходимо выполнить: такие, как однородность и неоднородность колебания ЭВБ, которые происходили в течение длительного периода. Оценка изменения ЭВБ осуществлялась с помощью статистических критериев Стьюдента и Фишера [12]. Чтобы оценить степень однородности (неоднородности) средних показателей и дисперсии рядов сезонных и годовых ЭВБ бассейна р. Волги в зоне формирования до г. Волгограда, использованы ряды продолжительностью с 1914/1915 по 2020/2021 гг., $n = 107$ лет.

В результате расчета выявлена неоднородность среднемноголетнего значения для годового стока, общего испарения и трансформации бассейновых влагозапасов. Среднемноголетние значения годовых величин атмосферных осадков оказались однородными. Среднемноголетнее значение речного стока за два выделенных периода (первый – 1914/1915-1975/1976 гг., второй – 1976/1977-2020/2021 гг.) составили 181 и 202 мм/год, для общего испарения – 491 и 438 мм/год, для трансформации бассейновых влагозапасов – 14 и 19 мм/год соответственно. Во всех этих случаях расчетные значения t -критерия Стьюдента оказались больше, чем критическое значение: $3,23 > 1,66$; $6,54 > 1,66$; $2,96 > 1,66$ соответственно при уровне значимости

критерия $\alpha = 5\%$. Следовательно, среднемноголетние значения годовой величины стока, общего испарения и трансформации бассейновых влагозапасов являются неоднородными.

В отличие от годовых значений некая «пестрая» картина наблюдается в период весеннего половодья и межени. Все среднемноголетние величины ЭВБ в период половодья оказались однородными. Однородными также оказались атмосферные осадки меженного периода, а такие составляющие, как среднемноголетнее значение речного стока, общее испарение и трансформация бассейновых влагозапасов для меженного периода, оказались неоднородными. Применительно к дисперсиям всех рассмотренных ЭВБ для выделенных периодов свойственна однородность дисперсий. Следовательно, для колебаний ЭВБ бассейна р. Волги в XX в. характерна неоднородность по их среднемноголетнему значению, за исключением атмосферных осадков. В то же время их дисперсии за XX в. почти не изменились в отличие от среднемноголетнего значения и оказались однородными.

Выводы

1. Проведенный сопряженный анализ, направленный на изучение изменчивости ЭВБ бассейна р. Волги, позволил сделать следующие выводы. Наиболее вероятной предпосылкой образования маловодья в бассейне р. Волги является соотношение температуры и влаги, при котором спад осадков соответствует росту общего испарения воды с поверхности водосборов. Можно также отметить следующую закономерность: период повышенной водности совпадает с периодом увеличения осадков и уменьшения общего испарения. Альтернативой являются условия, когда период

сниженной водности совпадает с периодом спада осадков и увеличения общего испарения. Поэтому можно сделать вывод о том, что изменчивости ЭВБ за длительный период годового стока р. Волги свойственна цикличность, отличающая его от «белого шума».

2. Ретроспективный анализ изменения ЭВБ показывает, что среднемноголетним значениям годового и меженного стоков свойствен возрастание тренд, тогда как в период половодья обнаруживается тенденция уменьшения. Причиной возрастания нормы годового стока и стока меженного периода являются увеличение атмосферных осадков и повышение температуры приземного слоя воздуха, особенно в зимний период.

3. Анализ изменения среднегодовой температуры приземного воздуха бассейна р. Волги за период 1901/1902-2020/2021 гг. показал, что приращение линейного тренда температуры приземного воздуха составляет для года в целом $1,9^\circ\text{C}/120$ лет, для холодного периода – $(-2,9)^\circ\text{C}/120$ лет. Обнаружены устойчивые тенденции (тренды) возрастания среднемноголетней величины температуры приземного слоя воздуха. Потепление наиболее ярко выражено в холодные полугодия, в то время как в теплые периоды года наблюдается незначительное похолодание. Установлено отсутствие коррелятивной связи между речным стоком, суммарным испарением и температурой приземного воздуха: $-0,13$ и $0,12$ соответственно. Это объясняется сложной пространственной неоднородностью изменения годовой и сезонной температуры приземного воздуха и недоучетом влияния подстилающей поверхности, то есть влияния ландшафтов, в пределах которых и формируются составляющие водного баланса.

Список использованных источников

1. Бэйтес Б.К., Кундцевич З.В., Саохон У., Палютикоф Ж.П. Изменение климата и водные ресурсы. Технический проект Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК). Женева: 2008. 228 с.
2. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации: Общее резюме. М.: Росгидромет, 2014. 60 с.
3. Кислов А.В., Евстигнеев В.М., Малхазова С.М. и др. Прогноз климатической ресурсообеспеченности Восточно-Европейской равнины в условиях потепления XXI века. Монография. М.: МАКС ПРЕСС, 2008. 292 с.
4. Исмайлов Г.Х., Мурашенкова Н.В. Оценка изменения и взаимосвязи элементов водного баланса бассейна р. Волги в условиях изменения климата // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2015. № 5. С. 4-7.

References

1. Bates B.K., Kundtsevich Z.V., Saohon U., Palyutikof J.P. (eds.) Climate change and water resources. Technical design. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Geneva, 2008. 228 p.
2. Second assessment report of Roshydromet on climate change and its consequences in the Russian Federation. General summary. Moscow, Roshydromet Publ., 2014. 60 p.
3. Kislov A.V. Forecast of climatic resource provision of the East European Plain in the conditions of flooding of the XXI century] / Evstigneev V.M., Malkhazova S.M. et al. Moscow, MAKS PRESS PUBL., 2008. 292 p.
4. Ismaiyllov G.Kh., Murashchenkova N.V. Assessment of changes and interrelations of water balance elements in the Volga river basin under climate change // Water Management in Russia: problems, technologies, management. 2015. № 5. P. 4-7.
5. Water Resources of Russia and their use: monograph // Ed. by I.A. Shiklomanov. St. Petersburg, GGU Publ., 2008. 600 p.

5. Водные ресурсы России и их использование: монография / Под ред. И.А. Шикломанова. СПб.: ГТУ, 2008. 600 с.

6. Бабкин В.И., Смирнов Н.П. Динамика стока рек Центрального района России // Метеорология и гидрология. 2007. № 9. С. 80-83.

7. Исмайлов Г.Х., Федоров В.М. Межгодовая изменчивость и взаимосвязь элементов водного баланса р. Волги // Водные ресурсы. 2008. Т. 35, № 3. С. 259-276.

8. Исмайлов Г.Х., Муращенкова Н.В., Исмайлова И.Г. Методика оценки сложноформируемых элементов водного баланса (суммарного испарения и влагозапасов) речного бассейна // Природообустройство. 2020. № 5. С. 88-95.

9. Исмайлова И.Г. Моделирование элементов водного баланса р. Волги для создания информационно-аналитической гидрометеорологической базы данных. Уфа: Вестник науки, 2023. С. 23-38.

10. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2022 год. М.: РОСГИДРОМЕТ, 2023. 104 с. ISBN 978-5-906099-58-7

11. Кислов А.В., Торопов П.А. Моделирование климатических условий Восточно-Европейской равнины и вариации стока р. Волги в эпоху позднеледникового похолодания // Вестник Московского университета. Серия 5 «География». 2006. № 2. С. 13-17.

12. Методические рекомендации по оценке однородности гидрологических характеристик и определению их расчетных значений по неоднородным данным. СПб.: Нестор-история, 2010. 160 с.

Об авторе

Ирина Габилевна Исмайлова, заведующая лабораторией кафедры гидравлики, гидрологии и управления водными ресурсами; igism37@mail.ru

Критерии авторства / Criteria of authorship

Исмайлова И.Г. выполнила теоретические исследования, на основании которых провела обобщение и написала рукопись, имеет на статью авторское право и несёт ответственность за плагиат.

Поступила в редакцию / Received at the editorial office 28.12.2023

Поступила после рецензирования / Received after peer review 16.02.2024

Принята к публикации / Accepted for publication 16.02.2024

6. Babkin V.I., Smirnov N.P. Dynamics of river flow in the Central District of Russia. // Meteorology and hydrology. 2007. № 9. P. 80-83.

7. Ismaiyllov G.Kh., Fedorov V.M. Interannual variability and interconnection of elements of the water balance of the Volga River] // Water resources, 2008. V. 35. No 3. P. 259-276.

8. Ismaiyllov G.Kh., Murashchenkova N.V., Ismaiyllova I.G. Methodology for assessing the complexly formed elements of the water balance (total evaporation and moisture reserves) of the river basin // Prirodoobustroystvo. 2020. № 5. P. 88-95.

9. Ismaiyllova I.G. Modeling of the Volga River water balance elements for the creation of information and analytical hydro meteorological databases. Ufa: Publishing house NITS Bulletin of Science, 2023. P. 23-38.

10. Report on climate features in the Russian Federation for 2022. Moscow, ROSHYDROMET Publ., 2023. 104 p. ISBN 978-5-906099-58-7

11. Kislov A.V., Toropov P.A. Modeling of climate conditions of the East European Plain and variations of the flow of the Volga River in the epoch of the late Pleistocene cooling. // Vestnik of the Moscow University. Series 5. Geography, 2006. No 2. P. 13-17.

12. Methodological recommendations for the assessment of the homogeneity of hydrological characteristics and the determination of their calculated values based on heterogeneous data. St. Petersburg, Nestor-Istoriia Publ., 2010. 160 p.

Author information

Irina G. Ismaiyllova, head of the laboratory of the department of Hydraulics, hydrology and water resources management; igism37@mail.ru

I.G. Ismaiyllova performed theoretical research, on the basis of which she generalized and wrote the manuscript, she has copyright on the article and is responsible for plagiarism.