

Гидравлика и инженерная гидрология

Оригинальная статья

УДК 556.164: 551.585: 556.53

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-1-89-97>МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИТОКА РЕЧНЫХ ВОД
К ВОЛГОГРАДСКОМУ ГИДРОУЗЛУ В БАСЕЙНЕ РЕКИ ВОЛГИИ.Г. Исмайлова¹

¹ ФГБОУ ВО Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева;
Институт мелиорации, водного хозяйства и строительства имени А.Н. Костякова; Москва, Российская Федерация

¹ ismayilova@rgau-msha.ru; ORCID: 0000-0002-3087-0184

Аннотация. Рассмотрен вопрос исследования наличия корреляционной связи между элементами водного баланса бассейна реки Волги в зоне формирования в створе Волгоградского гидроузла. Исследования показывают наличие устойчивых корреляций (превышающих 0,7) между объемами речного стока, поступающего к Волгоградскому гидроузлу в течение года и в различные сезоны (периоды половодья и межени), и климатическими параметрами, определяющими его. К этим параметрам относятся атмосферные осадки, испарение, разница между осадками и испарением (эффективные осадки), а также температура подстилающей поверхности. Существование продолжительных временных рядов по составляющим водного баланса (наблюденные и расчетные) позволило осуществить идентификацию и получить системы уравнений для оценки притока речных вод бассейна реки Волги в зоне формирования в створе Волгоградского гидроузла в изменяющихся условиях глобального и, как следствие, регионального климата. Получено достаточно хорошее соответствие статистических параметров расчетного и фактического притока речных вод бассейна р. Волги в зоне формирования в створе Волгоградского гидроузла. Установлено, что отсутствуют корреляционные связи между суммарным испарением и температурой приземного воздуха. Предлагается уравнение связи, позволяющее определить температуру подстилающей поверхности, принимая во внимание влияние температуры воздуха и количество выпавших осадков в предыдущем году. Проведена оценка притока воды к Волгоградскому гидроузлу с точки зрения его межгодовой изменчивости как в текущий период, так и в обозримом будущем.

Ключевые слова: климатические параметры, объем речного стока, осадки, гидрологическая система, статистические параметры, уравнение связи, корреляция, межгодовая изменчивость, глобальный климат

Для цитирования: Исмайлова И.Г. Моделирование притока речных вод к Волгоградскому гидроузлу в бассейне реки Волги. Природообустройство. 2026;Т.19(1):89-97. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-1-89-97>

Original article

MODELING THE INFLOW OF RIVER WATERS TO THE VOLGOGRAD
HYDROELECTRIC COMPLEX IN THE VOLGA RIVER BASINI.G. Ismaiylowa¹

¹ Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy named after C.A. Timiryazev; A.N. Kostyakov Institute of Land Reclamation, Water Management and Construction; Moscow, Russian Federation

¹ ismayilova@rgau-msha.ru; ORCID: 0000-0002-3087-0184

Abstract. The article discusses the existence of a correlation between the elements of the water balance of the Volga River basin in the area of the Volgograd Hydroelectric Complex. The research shows that there are stable correlations (greater than 0.7) between the volume of river flow that reaches the Volgograd Hydroelectric Complex throughout the year and in different seasons (during flood and low-water periods), and the climatic parameters that determine it. These parameters include precipitation, evaporation, the difference between precipitation and evaporation (effective precipitation), and the temperature of the underlying surface. The existence of long-term time series for the components of the water

balance (observed and calculated) has allowed for the identification and development of systems of equations for estimating the inflow of river water from the Volga River basin in the area of formation at the Volgograd Hydroelectric Complex under changing global and, consequently, regional climate conditions. The results show a good fit between the statistical parameters.

Keywords: climatic parameters, river flow volume, precipitation, hydrological system, statistical parameters, relationship equation, correlation, interannual variability, global climate

Citation format: Ismaiylva I.G. Modeling the Inflow of River Waters to the Volgograd Hydroelectric Complex in the Volga River Basin. *Prirodoobustroystvo*. 2026;19(1):89-97. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-1-89-97>

Введение. Преобразования гидрологического цикла связаны с гидрометеорологическими и антропогенными изменениями в водосборных речных бассейнах. Оценить эти преобразования, предсказать их изменения и, наконец, выявить влияние этих изменений на процесс формирования речного стока – важнейшие задачи современной гидрологии. В настоящее время в области применения математического моделирования на формирование речного стока сложилось три главных подхода, различающихся в зависимости от используемых данных [1]. Первый подход составляют математические модели, которые создаются без учета данных о строении и параметрах функционирования гидрологической системы, и она представляется как «черный ящик». Второй подход – концептуальные модели, в которых физическое описание гидрологической системы частично, но используются системы уравнений для расчета речного стока от определяющих его гидрометеорологических и антропогенных факторов. Третий подход – физико-математические модели, базирующиеся на детализированных физических представлениях и основанные на измеряемых параметрах водосбора.

В статье приводятся результаты концептуальной модели верификации уравнений связи годового и сезонного стока бассейна Волги от определяющих его параметров. С этой целью были использованы временные ряды притока речных вод к Волгоградскому гидроузлу и гидрометеорологические факторы – такие, как атмосферные осадки, суммарное испарение, эффективные осадки, температура подстилающей поверхности бассейна Волги [2-4].

Развитие гидрологических моделей формирования речного стока в зависимости от гидрометеорологических факторов необходимо не только для совершенствования гидрологической базы инженерной гидрологии. Это связано прежде всего с изменением современного климата Земли [5-7], а также с решением новых задач в области водоземлепользования и повышением требований к точности, надежности и детальности гидрологических прогнозов [8].

Длительные временные ряды элементов водного баланса (ЭВБ), приведенные в работе [3], позволили не только осуществить сравнительный ретроспективный анализ, но и выполнить проверку корректности уравнений, связывающих годовой и сезонный сток Волги с природными (климатическими) факторами, которые на него влияют. В связи с этим необходимо прежде всего провести анализ и выполнить оценку наличия корреляционных связей ЭВБ и температуры приземного слоя, чтобы выявить уровень связи исследуемых элементов водного баланса.

Цель исследований: представить результаты концептуальной модели верификации уравнений связи годового и сезонного стока бассейна Волги от определяющих его параметров, используя временные ряды притока речных вод к Волгоградскому гидроузлу и гидрометеорологические факторы – такие, как атмосферные осадки, суммарное испарение, эффективные осадки, температура подстилающей поверхности бассейна Волги.

Материалы и методы исследований. Для анализа изменения среднегодовой температуры воздуха применяются данные метеостанций, располагающие длительными рядами наблюдений. Эти станции, как правило, находятся в густонаселенных и промышленно развитых районах, где уровень хозяйственного освоения и урбанизации достигает 70-75%. В результате данные наблюдений за ними не отражают изменения температуры воздуха тех ландшафтов, в пределах которых и формируется водный баланс речного бассейна. Кроме того, известно, что при расчетах суммарного испарения и испаряемости вместо температуры испаряющей поверхности используют температуру воздуха, измеренную на площадке метеостанции на высоте 2 м, то есть вид подстилающей поверхности (вода, почва, растительность и др.) не учитывается. В результате различие температур воздуха и испаряющей поверхности связано с ошибками при вычислении суммарного испарения и, как следствие, речного стока.

Результаты и их обсуждение. Корреляционный анализ не выявил значимых связей между испарением и температурой приземного воздуха (0,12), а также между речным стоком и этой же температурой (– 0,13). Вероятно, это обусловлено комплексным характером изменений годовой температуры воздуха, имеющих пространственную неоднородность, и выраженной зависимостью от сезонных колебаний. Наиболее интенсивное повышение температуры отмечается в холодное время года, в теплое же время года наблюдается небольшое снижение температурных показателей. Обнаружена существенная взаимосвязь испарения, речного стока и температуры поверхности, с которой происходит испарение. Коэффициент корреляции с речным стоком составил – 0,51, а с испарением – 0,52. Выявлено, что зависимость между температурой поверхности испарения и температурой воздуха практически отсутствует и равна 0,02. Для расчета среднегодовой температуры испаряющей поверхности (T^*) на основе известных данных о температуре приземного воздуха (T) было применено уравнение из работ В.С. Мезенцева [9]:

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

Согласно формуле (1) температурная дельта между поверхностью испарения водосборной площади и приземным слоем воздуха определяется как температурой воздуха, так и количеством осадков, выпавших в предыдущем году P_{i-1} .

Опираясь на соотношение (1), а также располагая данными о годовых температурах воздуха T и количестве осадков за предыдущий год (P_{i-1}), рассчитали температуру испаряющей поверхности водосборной площади. В результате получили достаточно длительные временные

ряды испаряющей поверхности водосбора бассейна Волги в створе Волгоградского гидроузла.

Впоследствии был проведен анализ корреляции между сезонным (в период половодья и межени) и годовым речным стоком Волги и факторами, оказывающими на него влияние, включая температуру воздуха у поверхности земли и испаряющей поверхности водосбора. Анализ выполнен для двух вариантов: 1914/1915-2020/2021 гг. ($n = 107$ лет) и 1901/1902-2020/2021 гг. ($n = 120$ лет).

Результаты исследования парной корреляции между ЭВБ за половодье и межень и для года в целом приведены в таблицах 1-3. Как следует из данных таблиц, наблюдается достаточно тесная взаимосвязь следующих ЭВБ. Между годовым стоком и осадками она составляет 0,62; между годовым стоком и суммарным испарением равна – 0,42; между годовым стоком и бассейновыми влагозапасами равна – 0,89; между годовым стоком и эффективными осадками – 0,97; между годовым стоком и температурой испаряющей поверхности – 0,51 (табл. 1).

Зависимость между объемом половодья и количеством выпавших осадков составляет 0,47; корреляция между объемом половодья и испарением равна – 0,52; существует обратная зависимость (– 0,45) между объемом половодья и запасами влаги в бассейне; наблюдается связь между объемом половодья и эффективными осадками – 0,78 (табл. 2). Между стоком в период межени и атмосферными осадками она составляет 0,42; между стоком в период межени и суммарным испарением равна – 0,71; между стоком в период межени и бассейновыми влагозапасами – 0,79; между стоком в период межени и эффективными осадками – 0,88 (табл. 3).

Таблица 1. Матрица коэффициентов парной корреляции между годовыми составляющими водного баланса в створе Волгоградского г/у за 1901/1902-2020/2021 гг. ($n = 120$ лет)

Table 1. Matrix of pairwise correlation coefficients between annual components of the water balance in the Volgograd hydroelectric complex for 1901/1902-2020/2021 ($n = 120$ years)

ЭВБ EWB	Pr	Rr	Er	$\pm \Delta V$	Pr-Rr	Pr-Er	ТГ* ТА	ТГ ТА
Pr	1,00	0,62	0,45	–0,91	0,92	0,81	–0,06	0,01
Rr	0,62	1,00	–0,42	–0,89	0,27	0,97	–0,51	0,12
Er	0,45	–0,42	1,00	–0,03	0,76	–0,17	0,52	–0,13
$\pm \Delta V$	–0,91	–0,89	–0,03	1,00	–0,67	–0,98	0,31	–0,07
Pr-Rr	0,92	0,27	0,76	–0,67	1,00	0,51	0,19	–0,05
Pr-Er	0,81	0,97	–0,17	–0,98	0,51	1,00	–0,41	0,10
ТГ* ТА	–0,06	–0,51	0,52	0,31	0,19	–0,41	1,00	0,02
ТГ ТА	0,01	0,12	–0,13	–0,07	–0,04	0,10	0,02	1,00

Результаты анализа корреляционных матриц (табл. 1-3) ЭВБ со всей очевидностью показывают существование достаточно тесной взаимосвязи годового и сезонного речного стока в зависимости от определяющих его природных (климатических) факторов:

$$R = f(P, E, T); \quad (2)$$

$$R = f(P, E); \quad (3)$$

$$R = f(P - E). \quad (4)$$

Для оценки притока речных вод бассейна Волги в зоне формирования в створе Волгоградского гидроузла (г/у) наряду с уравнениями (2)-(4) также получены уравнения видов:

$$\Delta R = f(\Delta P, \Delta E, \Delta T); \quad (5)$$

Таблица 2. Матрица коэффициентов парной корреляции между составляющими водного баланса в половодье в створе Волгоградского г/у за 1914/1915-2020/2021 гг. (n = 107 лет)

Table 2. Matrix of pairwise correlation coefficients between the components of the water balance in high water in the Volgograd hydroelectric complex for 1914/1915-2020/2021 (n = 107 years)

ЭВБ EWB	Рп	Рп	Еп	±ΔV	Рм-Рм	Рм-Ем	ТТ TW	ТХ TC
Рп	1,00	0,47	0,25	1,0	0,85	0,92	-0,05	-0,11
Рп	0,47	1,00	-0,52	-0,45	-0,07	0,78	-0,14	-0,15
Еп	0,25	0,52	1,00	-0,24	-0,03	0,41	0,17	0,31
±ΔV	1,0	-0,44	-0,24	1,00	-0,86	-0,91	0,04	0,10
Рп-Рп	0,85	-0,07	-0,03	-0,86	1,00	0,58	0,03	-0,03
Рп-Еп	0,92	0,77	0,41	-0,91	0,58	1,00	-0,10	-0,14
ТТ TW	-0,05	-0,14	0,17	0,04	0,03	-0,09	1,00	0,25
ТХ TC	-0,11	-0,15	0,31	0,10	-0,03	-0,14	0,25	1,00

Таблица 3. Матрица коэффициентов парной корреляции между составляющими водного баланса в период межени в створе Волгоградского г/у за 1914/1915-2020/2021 гг. (n = 107 лет)

Table 3. Matrix of pairwise correlation coefficients between the components of the water balance during the low-water period in the Volgograd hydroelectric complex for 1914/1915-2020/2021 (n = 107 years)

ЭВБ EWB	Рм	Рм	Ем	±ΔV	Рм-Рм	Рм-Ем	ТТ TW	ТХ TC
Рм	1,00	0,42	0,26	-0,81	0,85	0,74	0,05	-0,22
Рм	0,42	1,00	-0,71	-0,79	0,20	0,88	0,29	0,30
Ем	0,26	-0,71	1,00	0,12	0,55	-0,29	-0,30	-0,49
±ΔV	-0,81	-0,79	0,12	1,00	-0,76	-0,99	-0,15	0,01
Рм-Рм	0,85	0,20	0,55	-0,76	1,00	0,64	-0,07	-0,33
Рм-Ем	0,74	0,88	-0,29	-0,99	0,64	1,00	0,19	0,08
ТТ TW	0,05	0,29	-0,30	-0,15	-0,07	0,19	1,00	0,25
ТХ TC	-0,22	0,30	-0,49	0,01	-0,33	0,08	0,25	1,00

Примечание: Р_г, Р_п, Р_м – осадки годовые, в период половодья и межени; Р_г, Р_п, Р_м – речной сток годовой, периода половодья и межени; Е_г, Е_п, Е_м – испарение годовое, периода половодья и межени; ТТ, ТХ – температура теплого и холодного периода; Р_п-Р_п, Р_м-Р_м, Р_г-Р_г – соответственно эффективные осадки половодья, межени и года, которые задействованы в формировании испарения; Р_г-Е_г, Р_п-Е_п, Р_м-Е_м – эффективные осадки годовые, периода половодья и межени, участвующие в создании речного стока; ТТ* – средняя годовая температура подстилающей поверхности; ТГ – средняя годовая температура воздуха.

Note: Р_g, Р_p, Р_m – annual precipitation, during high water and low water; Р_g, Р_p, Р_m – annual river runoff, flood and low water periods; Е_g, Е_p, Е_m – annual evaporation, during the period of high water and low water; ТТ, ТХ is the temperature of the warm and cold periods; Р_p-Р_p, Р_m-Р_m, Р_g-Р_g are the effective precipitations of floods, low-water and years, respectively, which are involved in the formation of evaporation; Р_g-Е_g, Р_p-Е_p, Р_m-Е_m – effective annual precipitation, flood periods and low-water periods, participating in the creation of river flow; ТГ* – average annual temperature of the underlying surface; ТГ is the average annual air temperature.

$$\Delta R = f(\Delta P, \Delta E); \quad (6)$$

$$\Delta R = f[\Delta(P - E)]. \quad (7)$$

Уравнения (5)-(7) содержат в себе данные о ежегодных отклонениях ЭВБ от их среднеголетних значений, которые являются их ежегодными отклонениями от их нормы. В итоге можно прийти к выводу о том, что расчетные величины речного стока (притока) можно представить как

$$R_i = R_{cp} + \Delta R_i. \quad (8)$$

При использовании результатов проведенного нами сравнительного ретроспективного анализа для всего бассейна р. Волги в зоне формирования [10], а также установленной корреляционной связи между ЭВБ выведены соотношения, описывающие зависимость годового и сезонного речного стока от основных климатических параметров. Для получения многофакторного уравнения притока бассейна Волги было использовано программное обеспечение, приведенное в работе [11]. В результате получены следующие уравнения.

Период 1914 / 1915-2020 / 2021 гг. (n = 107 лет)

Год

$$R_{\Gamma} = 0,300P_{\Gamma} - 0,538E_{\Gamma} + 244,31; \quad R = 0,93; R^2 = 0,87 \quad (9)$$

$$R_{\Gamma} = 0,347(P_{\Gamma} - E_{\Gamma}) + 124,16; \quad R = 0,88; R^2 = 0,77 \quad (10)$$

$$R_{\Gamma} = 0,209P_{\Gamma} - 25,502T\Gamma^* + 144,27; \quad R = 0,76; R^2 = 0,58 \quad (11)$$

$$R_{\Gamma} = 0,285P_{\Gamma} - 0,471E_{\Gamma} - 8,489T\Gamma^* + 253,62; \quad R = 0,94; R^2 = 0,89 \quad (12)$$

Половодье

$$R_{\Pi} = 0,186P_{\Pi} - 1,0571E_{\Pi} + 173,74; \quad R = 1,0; R^2 = 1,0 \quad (13)$$

$$R_{\Pi} = 0,3593(P_{\Pi} - E_{\Pi}) + 56,38; \quad R = 0,88; R^2 = 0,78 \quad (14)$$

Межень

$$R_{\text{М}} = 0,2331P_{\text{М}} - 0,4006E_{\text{М}} + 139,66; \quad R = 0,94; R^2 = 0,89; \quad (15)$$

$$R_{\text{М}} = 0,24225(P_{\text{М}} - E_{\text{М}}) + 56,38; \quad R = 0,88; R^2 = 0,78; \quad (16)$$

$$R_{\text{М}} = 0,2332P_{\text{М}} - 0,4008E_{\text{М}} - 0,0314T\text{Т} + 140,09; \quad R = 0,94; R^2 = 0,89 \quad (17)$$

Период 1901 / 1902-2020 / 2021 гг. (n = 120 лет)

Год

$$R_{\Gamma} = 0,4117P_{\Gamma} - 0,5889E_{\Gamma} + 195,78; \quad R = 1,0; R^2 = 1,0 \quad (18)$$

$$R_{\Gamma} = 0,4313(P_{\Gamma} - E_{\Gamma}) + 107,68; \quad R = 0,96; R^2 = 0,93 \quad (19)$$

$$R_{\Gamma} = 0,4054(P_{\Gamma} - E_{\Gamma}) - 6,4378T\Gamma^* + 135,8; \quad R = 0,97; R^2 = 0,95 \quad (20)$$

$$R_{\Gamma} = 0,2422P_{\Gamma} - 21,5719T\Gamma^* + 106,0; \quad R = 0,79; R^2 = 0,62 \quad (21)$$

Как следует из систем уравнений (9)-(21), коэффициенты множественной корреляции (R) для всех полученных уравнений связи изменяются от 0,76 до 0,97, а коэффициенты детерминации (R^2) – от 0,62 до 0,95. Следовательно, критерий (R) и (R^2), учитывающий адекватность уравнений (9)-(21), является достаточно высоким. Для окончательного установления адекватности соотношений (9)-(21) рассчитаны статистические характеристики расчетного и наблюдаемого речного стока бассейна Волги в створе Волгоградского г/у. При этом рассмотрены два базовых периода, различающиеся продолжительностью периода наблюдений, – 107 и 120 лет. Результаты представлены в таблицах 4-6.

Настоящие исследования убедительно демонстрируют, что уравнения (9)-(21), которые

дают возможность вычислить объем речного стока (годовой, в период половодья и межени) от климатических показателей, включая температуру подстилающей поверхности, могут быть использованы при изменяющемся климате в данном бассейне. При этом целесообразно сначала использовать уравнения (9), (12), (13), (15), (17)-(20), хотя и другие виды уравнений связи: (10), (11), (14), (16) и (21) – имеют право на существование.

Кроме вышеизложенных систем уравнений (9)-(21), были получены системы уравнений, описывающие зависимости отклонения притока речных вод (ΔR) бассейна р. Волги в зоне формирования у Волгоградского г/у, связанные с отклонением определяющих его климатических факторов от их нормы, – (5)-(7).

Таблица 4. Сравнение статистических характеристик расчетного и наблюдаемого (условно-естественного) годового речного стока за период 1914/1915-2020/2021 гг. (n =107 лет)

Table 4. Comparison of statistical characteristics of the estimated and observed (conditionally natural) annual river flow for the period 1914/1915-2020/2021 (n =107 years)

Статистические параметры <i>Statistical Options</i>	Год / Year				
	Фактический приток <i>Actual inflow</i>	Ур-е (9) <i>Eq-n (9)</i>	Ур-е (10) <i>Eq-n (10)</i>	Ур-е (11) <i>Eq-n (11)</i>	Ур-е (12) <i>Eq-n (12)</i>
Среднее / Average (R , мм / год)	190	190	190	190	190
Стандарт / Standard σ_R	34	32	30	26	32
C_V	0,18	0,17	0,16	0,14	0,17
r [1]	0,46	0,49	0,40	0,52	0,54
R	–	0,93	0,88	0,76	0,94
R^2	–	0,87	0,77	0,58	0,89

Таблица 5. Сравнение статистических характеристик расчетного и наблюдаемого (условно-естественного) сезонного речного стока за период 1914/1915-2020/2021 гг. (n =107 лет)

Table 5. Comparison of the statistical characteristics of the estimated and observed (conditionally natural) seasonal river flow for the period 1914/1915-2020/2021 (n =107 years)

Статистические параметры <i>Statistical Options</i>	Половодье / Flood			Межень / Low water			
	Фактический приток <i>Actual Inflow</i>	Ур-е (13) <i>Eq-n (13)</i>	Ур-е (14) <i>Eq-n (14)</i>	Фактический приток <i>actual inflow</i>	Ур-е (15) <i>Eq-n (15)</i>	Ур-е (16) <i>Eq-n (16)</i>	Ур-е (17) <i>Eq-n (17)</i>
Среднее / Average (R , мм / год)	116	116	116	74	74	74	74
Стандарт / Standard σ_R	24	24	19	21	20	18	20
C_V	0,21	0,21	0,16	0,28	0,27	0,24	0,27
r [1]	0,20	0,20	0,10	0,38	0,31	0,29	0,31
R	–	1,0	0,88	–	0,94	0,88	0,94
R^2	–	1,0	0,78	–	0,89	0,78	0,89

Таблица 6. Сравнение статистических характеристик расчетного и наблюдаемого (условно-естественного) годового речного стока за период 1901/1902-2020/2021 гг. (n =120 лет)

Table 6. Comparison of statistical characteristics of the estimated and observed (conditionally natural) annual river flow for the period 1901/1902-2020/2021 (n =120 years)

Статистические параметры <i>Statistical Options</i>	Год / Year				
	Фактический приток <i>Actual inflow</i>	Ур-е (18) <i>Eq-n (18)</i>	Ур-е (19) <i>Eq-n (19)</i>	Ур-е (20) <i>Eq-n (20)</i>	Ур-е (21) <i>Eq-n (21)</i>
Среднее / Average (R , мм / год)	190	190	190	190	190
Стандарт / Standard σ_R	31	31	30	31	25
C_V	0,16	0,16	0,16	0,16	0,13
r [1]	0,43	0,43	0,40	0,46	0,51
R	–	1,0	0,96	0,97	0,79
R^2	–	1,0	0,93	0,95	0,62

Период 1914 / 1915-2020 / 2021 гг. ($n = 107$ лет)

Год

$$\Delta R_{\Gamma} = 0,3004\Delta P_{\Gamma} - 0,5376\Delta E_{\Gamma} + 0,1637; \quad R = 0,93; R^2 = 0,87 \quad (22)$$

$$\Delta R_{\Gamma} = 0,285\Delta P_{\Gamma} - 0,471\Delta E_{\Gamma} - 8,486\Delta T_{\Gamma}^* + 0,1228; \quad R = 0,94; R^2 = 0,89 \quad (23)$$

Половодье

$$\Delta R_{\Pi} = 0,186\Delta P_{\Pi} - 1,057\Delta E_{\Pi}; \quad R = 1,0; R^2 = 1,0 \quad (24)$$

$$\Delta R_{\Pi} = 0,3393(\Delta P_{\Pi} - \Delta E_{\Pi}) - 0,1448; \quad R = 0,78; R^2 = 0,60 \quad (25)$$

Межень

$$\Delta R_{\text{М}} = 0,2331\Delta P_{\text{М}} - 0,4006\Delta E_{\text{М}} + 0,2868; \quad R = 0,94; R^2 = 0,89 \quad (26)$$

$$\Delta R_{\text{М}} = 0,2422(\Delta P_{\text{М}} - \Delta E_{\text{М}}) + 0,311; \quad R = 0,88; R^2 = 0,78 \quad (27)$$

Период 1901 / 1902-2020 / 2021 гг. ($n = 120$ лет)

Год

$$\Delta R_{\Gamma} = 0,4117\Delta P_{\Gamma} - 0,5889\Delta E_{\Gamma} - 3828; \quad R = 1,0; R^2 = 1,0 \quad (28)$$

$$\Delta R_{\Gamma} = 0,4313(\Delta P_{\Gamma} - \Delta E_{\Gamma}) - 0,3727; \quad R = 0,97; R^2 = 0,94 \quad (29)$$

$$\Delta R_{\Gamma} = 0,4054(\Delta P_{\Gamma} - \Delta E_{\Gamma}) - 6,4378\Delta T_{\Gamma}^* - 0,3770; \quad R = 0,97; R^2 = 0,94 \quad (30)$$

Анализ колебаний речного стока Волги в течение различных стадий водного режима, включая весеннее половодье, период межени и годовой цикл в целом, выполненный на протяжении длительного времени, дал возможность установить ряд математических соотношений – (2)-(30). Данные уравнения служат для вычисления объема стока Волги в годы с разной степенью водности, опираясь на данные о годовом и сезонном количестве атмосферных осадков, величине суммарного испарения, эффективных осадков ($P - E$) и температуры подстилающей поверхности.

Преимущество использования предлагаемой системы уравнений (2)-(30) при моделировании речного стока видим из следующего. В моделях общей циркуляции атмосферы и океана (МОЦАО) анализируются сдвиги в глобальной (региональной) температуре у поверхности земли, в количестве осадков и объеме испарения [5, 6]. Объем речного стока обычно вычисляется как разница между выпавшими осадками и испарением. Важно понимать, что подобный метод применим только для оценки долгосрочных периодов (30-50 лет). При анализе стока в отдельные годы, особенно в периоды экстремальных водных режимов (засушливые или многоводные годы), такой подход способен привести к значительным неточностям, так как не учитывает особенности и масштабы изменений запасов влаги в водосборном бассейне. Например, в исключительно засушливый период 1937/1938 гг. в бассейне реки Волги, при выпадении осадков в объеме 585 мм/год и испарении 543 мм/год, расчетный приток к Волгоградскому гидроузлу составляет 42 мм/год, в то время как фактический условно-естественный приток в этом году достигал

117 мм/год (расхождение составляет 64%), то есть вычисленное значение вдвое меньше реального. В действительности происходило уменьшение влагозапасов в бассейне на 75 мм/год. Если эти оценки выполнить по уравнению (8), приток к Волгоградскому г/у составит 125 мм/год (ошибка – 7%) а по уравнению (17) – 115 мм/год (ошибка – 2%).

Исходя из вышеизложенного, определенный интерес представляет оценка притока речных вод в зоне формирования бассейна р. Волги у Волгоградского г/у при различных сценариях изменения глобального и, как следствие, регионального климата в этом бассейне. В представленной работе проанализирована возможность применения климатических сценариев будущего по «МОЦАО», предложенных в третьем докладе (CMIP 3), который включает в себя глобальные модели для формирования роста парниковых газов и аэрозоля SRES A2, SRESA1B и SRES B1 [12, 13]. При этом SRES A2 является одним из самых «жестких» сценариев, SRESA1B – «промежуточный», SRES B1 – «мягкий» сценарий. С учетом данных, приведенных в таблицах 7, 8, а также с использованием уравнений (9), (12) и (20) нами была выполнена оценка притока речных вод бассейна р. Волги в зоне формирования у Волгоградского г/у за период 2011-2030 гг. и 2031-2050 гг. В случае сценария A2 результаты для 5 моделей «МОЦАО» представлены в таблице 7. Как следует из этих данных, для периода 2011-2030 гг. средний годовой приток по 5 моделям показал прирост в диапазоне 7-19 км³/год по сравнению с базовым уровнем, зафиксированным на отметке 257 км³/год. В период 2031-2050 гг. средний приток по 5 моделям – 1-17 мм/год (1,4-23 км³/год).

Следовательно, за период 2011-2030 гг. средний приток в зоне формирования может составлять от 186 до 208 мм/год (253-283 км³/год),

а в период 2031-2050 гг. – от 174 до 216 мм/год (237-295 км³/год). По сценарию В1 получили результаты, близкие к сценарию А2 (табл. 8).

Таблица 7. Средние значения параметров за 20-летний период объема речного стока в створе Волгоградского г/у на основе 5 различных моделей «МОЦАО» при реализации сценария А2

Table 7. Average values of the parameters for a twenty-year period of the volume of river flow in the site of the Volgograd hydroelectric complex based on five different models of MOTSAO under the implementation of the A2 scenario

Параметры <i>Parameters</i>	Сценария А2 / <i>Scenario A2</i>											
	Периоды 2011-2030 годы / <i>Periods of 2011-2030</i>						Периоды 2031-2050 годы / <i>Periods of 2031-2050</i>					
	Модель «МОЦАО» / <i>Model MOTSAO</i>						Модель «МОЦАО» / <i>Model MOTSAO</i>					
	1	2	3	4	5	Среднее <i>Average</i>	1	2	3	4	5	Среднее <i>Average</i>
$\bar{T}^{\circ}\text{C}$	4,6	4,9	4,6	4,9	3,9	4,6	5,7	6,1	5,5	5,6	4,0	5,5
P	719	672	688	711	709	700	753	682	710	699	726	714
E	474	462	466	472	468	468	470	472	472	466	464	469
R(9)	205	197	200	204	205	203	217	195	203	203	212	206
R(12)	196	186	191	192	202	194	198	174	187	186	208	190
R(20)	206	189	196	201	208	200	214	182	197	194	216	200

Таблица 8. Средние значения за 20-летний период объема речного стока в створе Волгоградского г/у на основе 5 различных моделей «МОЦАО» при реализации сценария В1

Table 8. Average values for a twenty-year period of the volume of river flow at the site of the Volgograd hydroelectric complex based on five different models of the MOTSAO under the implementation of scenario B1

Параметры <i>Parameters</i>	Сценария В1 / <i>Scenario B1</i>											
	Периоды 2011-2030 годы / <i>Periods of 2011-2030</i>						Периоды 2031-2050 годы / <i>Periods of 2031-2050</i>					
	Модель «МОЦАО» / <i>Model MOTSAO</i>						Модель «МОЦАО» / <i>Model MOTSAO</i>					
	1	2	3	4	5	Среднее <i>Average</i>	1	2	3	4	5	Среднее <i>Average</i>
$\bar{T}^{\circ}\text{C}$	5,0	5,4	4,9	4,6	4,2	4,8	5,7	5,9	5,6	5,3	4,4	5,4
P	744	671	721	678	721	707	754	684	732	691	717	716
E	480	461	475	463	471	470	461	472	465	471	462	466
R(9)	209	198	205	199	207	204	222	196	214	198	211	208
R(12)	197	182	194	190	202	193	203	176	196	184	203	192
R(20)	211	186	204	193	210	201	218	184	208	191	211	202

Выводы

Наличие достаточно длительных временных рядов по основным элементам водного баланса речного бассейна, включая температуру подстилающей поверхности, предоставило возможность выполнить сравнительный анализ многолетних колебаний элементов водного баланса бассейна р. Волги в зоне формирования у Волгоградского г/у и выявить свойственные им закономерности на протяжении периода наблюдений.

Анализ корреляционных матриц элементов водного баланса бассейна Волги показал, что

существуют достаточно тесные корреляционные связи между притоком речных вод к Волгоградскому гидроузлу (более 0,7) и определяющими его климатическими факторами. Выявленные закономерности послужили основой для построения систем уравнений связи притока речных вод к замыкающим створам от природных (климатических) факторов. Последние позволили дать оценку межгодовой и сезонной изменчивости притока бассейна р. Волги в зоне формирования в створе Волгоградского г/у на современном этапе и в прогнозируемой перспективе.

Список использованных источников

1. Кучмент Л.С., Демидов В.Н., Мотовилов Ю.Г. Формирование речного стока. М.: Издательство «Наука», 1983. 215 с.
2. Исмайлова И.Г. Моделирование элементов водного баланса р. Волги для создания информационно-аналитической гидрометеорологической базы данных: Сборник трудов конференции. Уфа: Изд-во НИЦ Вестник науки, 2023. С. 23-38. EDN: ZKPPLY
3. Исмайлов Г.Х., Муращенкова Н.В., Исмайлова И.Г. Методика оценки сложноформируемых элементов водного баланса // Природообустройство. 2020. № 5. С. 88-95. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2020-5-88-95>. EDN: CFNFQX
4. Исмайлова И.Г., Раткович Л.Д. Имитационная модель для анализа и оценки многолетнего и сезонного колебания элементов водного баланса бассейна реки Волги // Природообустройство. 2023. № 5. С. 103-110. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2023-5-103-110> environment.timacad.ru
5. Бэйтес Б.К., Кундцевич З.В., Саохон У., Палютинкоф Ж.П. (ред.). Изменение климата и водные ресурсы. Технический проект Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК). Женева, 2008. 228 с.
6. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. М.: Росгидромет, 2014. 60 с.
7. Кислов А.В., Евстигнеев В.М., Малхазова С.М. и др. Прогноз климатический ресурсообеспеченности Восточно-Европейской равнины в условиях потепления XXI века: Монография. М.: МАКС ПРЕСС, 2008. 292 с. EDN: QKHRYZ
8. Георгиевский Ю.М., Шаночкин С.В. Гидрологические прогнозы. СПб.: Изд-во РГГМУ, 2007. 436 с.
9. Мезенцев В.С., Карнацевич И.В. Увлажненность Западно-Сибирской равнины. Л.: Гидрометеиздат, 1969. 168 с.
10. Исмайлова И.Г., Ивченко Г.И. Исследование многолетней изменчивости элементов водного баланса речного бассейна в современном климате // Природообустройство. 2024. № 2. С. 69-78. DOI: 10.26897/1997-6011-2024-2-69-78 environment.timacad.ru
11. Боровиков В.П. Прогнозирование в системе СТАТИСТИКА в среде WINDOWS: Монография. М.: «Финансы и статистика», 1999. 382 с. EDN: QRDZYJ
12. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации: Монография: В 3 т. Т. 1. Основной / Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. М.: Росгидромет, 2014. 1008 с.
13. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2020 год / Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (РОСГИДРОМЕТ). Москва, 2021. 104 с.

Сведения об авторе

Ирина Габилловна Исмайлова, канд. техн. наук., заведующий лабораторией кафедры «Гидравлики, гидрологии и управления водными ресурсами»; ORCID: 0000-0002-3087-0184; ismayilova@rgau-msha.ru

References

1. Kuchment L.S., Demidov V.N., Motovilov Yu.G. Formation of River Flow. M.: Nauka Publishing House, 1983. 215 p.
2. Ismayylova I.G. Modeling of the Volga River Water Balance Elements for Creating an Information and Analytical Hydrometeorological Database. Ufa: Publishing House. NITs Vestnik Nauki, 2023. P. 23-38. EDN: ZKPPLY
3. Ismayilov G.Kh., Murashchenkova N.V., Ismayilova I.G. Methodology for Estimating Complexly Formed Elements of the Water Balance (Total Evaporation and Moisture Reserves) of a River Basin // Prirodoobustroystvo. 2020. No. 5. P. 88-95. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2020-5-88-95> EDN: CFNFQX
4. Ismayylova I.G., Ratkovich L.D. Simulation model for analysis and assessment of long-term and seasonal fluctuations of water balance elements in the Volga River basin // Prirodoobustroystvo. 2023, No. 5. P. 103-110. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2023-5-103-110>
5. Baites B.K., Kundtsevich Z.V., Saokhon U., Palyutikof Zh.P. (eds.) Climate Change and Water Resources. Technical Draft of the Intergovernmental Panel on Climate Change Technical project of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). – Geneva, 2008. 228 p.
6. The second assessment report of Roshydromet on climate change and its consequences in the Russian Federation. General summary. M: Roshydromet, 2014. 60 p. ISBN 978-5-904206-13-0.
7. Kislov A.V., Yevstigneyev V.M., Malkhazova S.M. et al. Forecast of the Climate Resource Availability of the East European Plain in the Context of the 21st Century Flooding. Moscow: MAKS PRESS, 2008. 292 p. EDN: QKHRYZ
8. Georgievsky Yu.M., Shanochkin S.V. Hydrological Forecasts. / Hydrological Forecasts. SPb.: Publishing House of RGGMU, 2007. 436 p.
9. Mezentsev V.S., Karnatsevich I.V. Moisture Content of the West Siberian Plain. L: Gidrometeoizdat, 1969. 168 p.
10. Ismayylova I.G. Research of Long-Term Variability of Elements of the River Basin Water Balance in the Modern Climate // Prirodoobustroystvo. 2024. No. 2. P. 69-78. DOI: 10.26897/1997-6011-2024-2-69-78 environment.timacad.ru
11. Borovikov V.P., Ivchenko G.I. Forecasting in the STATISTICA System in the WINDOWS Environment. Moscow: Finances and Statistics EDN: QRDZYJ
12. The Second Assessment Report of the Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring on Climate Change and Its Impacts in the Russian Federation: Monograph in 3 Volumes. Vol. 1. Main. Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring, Moscow: Roshydromet, 2014, 1008 p. EDN: UKLXXH
13. Report on the Climate Features in the Russian Federation for 2020. – Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring (ROSGIDROMET) Moscow. 2021. 104 p.

Information about the authors

Irina G. Ismayilova, CSs (Tech), Head of the Laboratory of Hydraulics, Hydrology, and Water Resource Management; ORCID: 0000-0002-3087-0184; ismayilova@rgau-msha.ru

Поступила в редакцию / Received 07.08.2025

Поступила после рецензирования / Received 17.09.2025

Принята к публикации / Accepted 27.09.2025