

Оригинальная статья  
УДК 551.585(282.247.41)  
<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2023-5-103-110>



## ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ АНАЛИЗА И ОЦЕНКИ МНОГОЛЕТНЕГО И СЕЗОННОГО КОЛЕБАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ВОДНОГО БАЛАНСА БАСЕЙНА РЕКИ ВОЛГИ

**Исмайлова Ирина Габилевна** , заведующий лабораторией;

<https://orcid.org/0000-0002-3087-0184>; [igism37@mail.ru](mailto:igism37@mail.ru)

**Раткович Лев Данилович** , д-р техн. наук, профессор;

SCOPUS6506421682; ORCID0000-0002-6900-2640; Leader ID4328212; [levkivr@mail.ru](mailto:levkivr@mail.ru)

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

**Аннотация.** Цель исследований – совершенствование методики водного баланса речного бассейна в части трудноизмеряемых элементов водного баланса – таких, как суммарное испарение с поверхности суши и изменение бассейновых влагозапасов. Для достижения цели модифицированы уравнение водного баланса речного бассейна и корреляционное уравнение, связывающее закономерности формирования речного стока текущего периода со стоком предыдущих лет. Представлена имитационная модель, в структуру которой вошли системы уравнений водного баланса и корреляционное уравнение речного бассейна. В результате совместного использования данных опорных гидрологических и метеорологических станций получены результаты имитационного моделирования и на этой основе организованы достаточно длительные временные ряды элементов водного баланса (ЭВБ) бассейна р. Волги в зоне формирования до г. Волгограда. С опорой на полученные длительные ряды ЭВБ бассейна р. Волги осуществлен сопряженный ретроспективный анализ межгодовой и сезонной изменчивости ЭВБ бассейна р. Волги в зоне формирования до г. Волгограда.

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

**Формат цитирования:** 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>


© Исмайлова И.Г., Раткович Л.Д., 2023

Original article

## SIMULATION MODEL FOR THE ANALYSIS AND ASSESSMENT OF LONG-TERM AND SEASONAL FLUCTUATIONS OF WATER BALANCE ELEMENTS IN THE VOLGA RIVER BASIN

**Ismailylova Irina Ghabilovna** , head of the laboratory

<https://orcid.org/0000-0002-3087-0184>; [igism37@mail.ru](mailto:igism37@mail.ru)

**Ratkovich Lev Danilovich** , doctor of technical sciences, professor;

SCOPUS6506421682; ORCID0000-0002-6900-2640; Leader ID4328212; [levkivr@mail.ru](mailto:levkivr@mail.ru)

Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy named after C.A. Timiryazev; 127434, Moscow, st. Timiryazevskaya, 49, Russia

**Abstract.** The purpose of the study is to improve the method of water balance of the river basin in terms of difficult-to-measure elements of water balance, such as total evaporation from the land surface and change in basin moisture reserves. For these purposes, the water balance equation of the river basin and the correlation equation connecting the patterns of formation of the river flow of the current period with the flow of previous years have been modified. A simulation model is presented, the structure of which includes systems of water balance equations and a correlation equation of a river basin. As a result of the joint use of these reference hydrological and meteorological stations, the results of simulation modeling were obtained and, on this basis, fairly long time series of water balance elements (EVB) of the Volga River basin in the formation zone to Volgograd were organized. Based on the obtained long

*series of EVB of the Volga River basin, a conjugate retrospective analysis of the interannual and seasonal variability of the EVB of the Volga River basin in the formation zone up to Volgograd was carried out.*

**Key words:** *atmospheric precipitation, evapotranspiration, basin moisture content, water balance, river basin, river flow, water balance elements, interannual variability*

**Format of citation:** *Ismailylova I.G., Ratkovich L.D. Simulation model for the 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>*

**Введение.** Управление водными ресурсами речных бассейнов является одной из важнейших практических задач XXI в., решение которой возможно лишь на основе познания механизма формирования элементов водного баланса (ЭВБ) речного бассейна [1, 2]. Неполнота наших знаний о количественных соотношениях между ЭВБ, о существующих между ними связях, особенно большая неопределенность в предвидении межгодовой и сезонной изменчивости не позволяют предусмотреть и учесть все возможные последствия, влияющие на водный режим речного стока. Это нередко приводит к неожиданным результатам, связанным не только с водообеспечением различных отраслей экономики, но и с проблемой защиты территории от водной стихии. Научная основа (критерий и надежность оценки) формирования и оптимального управления водными ресурсами речного бассейна во многом определяет складывающиеся соотношения между элементами водного и водохозяйственного баланса. В самом общем виде под водным балансом понимают совместное рассмотрение и сопоставление количественных характеристик прихода, расхода и изменения запасов влаги в пределах речного бассейна в определенный промежуток времени [3, 4].

К числу приходных элементов водного баланса относят атмосферные осадки и другие виды поступления влаги из атмосферы, а также приток воды из-за пределов речного водосбора в виде речных или подземных вод. К числу расходных элементов относят все виды испарения, а также отток воды за пределы водосбора по речному руслу или подземным путем.

Физически формирование водного баланса речных водосборов начинается с момента выпадения атмосферных осадков на его поверхность, развивается по мере их стекания или просачивания в толщу слагающих водосбор почвогрунтов и заканчивается выносом некоторого количества воды за пределы водосбора в виде стока через замыкающий створ или подземным путем. На всем пути передвижения атмосферных вод часть их теряется на испарения, которые происходят с поверхности растительного покрова, смоченного осадками, с поверхности почвы, снежного

покрова, водных объектов, из толщи почвогрунтов, слагающих водосбор, и, наконец, с поверхности грунтовых вод при неглубоком их залегании. Наряду с этим происходит процесс накопления и расходования поверхностных (в речной сети, в озерах и болотах, в снежном покрове) и подземных (в зонах аэрации и насыщения) влагозапасов. К результирующим элементам водного баланса относится изменение влагозапасов речного водосбора, которое выражается в их накоплении и сработке.

В зависимости от постановки задачи в качестве результирующего элемента водного баланса часто выступает речной сток. Составляющие водного баланса и их взаимосвязи объективно отражают существующие в природе соотношения между приходом и расходом влаги, сложившиеся в речных водосборах, и представляют наиболее комплексные характеристики водных ресурсов этих водосборов.

Метод водного баланса является в сущности единственным надежным методом, с помощью которого могут быть даны научно обоснованная оценка и прогноз изменения притока речных вод в характерных створах речного бассейна [1, 2]. Воднобалансовые исследования открывают принципиально новые возможности в гидрологии: в частности, заблаговременное предвидение межгодовой и сезонной изменчивости ЭВБ речного бассейна и построения уравнения связи притока речных вод в зоне формирования в зависимости от времени или определяющих его климатических факторов [5].

Метод водного баланса не только позволяет рассматривать все гидрологические явления в их совокупности и взаимосвязи, но и обеспечивает их количественные увязки по изучению закономерностей формирования гидрологического режима речного бассейна. Соответственно водный баланс можно рассматривать как систему, состоящую из отдельных взаимосвязанных процессов переноса влаги, находящуюся в состоянии динамического равновесия. В таких системах изменение одного из элементов (процессов) неизбежно вызывает изменение остальных элементов. Это открывает широкие возможности для направленного воздействия на водный режим речных

бассейнов, то есть управление их водными ресурсами.

Таким образом, водный баланс речного бассейна формируется в результате сложного взаимодействия вертикального влагообмена (атмосферные осадки и испарение), обусловленного термодинамическими факторами, с горизонтальным влагообменом (склоновый, русловой и поземный сток), определяемым гидромеханическими факторами.

ЭВБ свойственна пространственно-временная изменчивость. В первом случае рассматриваются особенности распределения и изменчивости ЭВБ по территории (частный участок речного бассейна, водохозяйственный район, речной бассейн, регион и страна в целом). Во втором случае исследуется изменение ЭВБ во времени (многолетие, год, сезон, месяц и т.п.). Поэтому большое значение приобретает вопрос о надежности оценки и прогноза ЭВБ речного бассейна, особенно речного стока, поскольку от его решения зависят многие проблемы, связанные с водообеспечением населения и секторов экономики и сохранением безопасности окружающей среды. В связи с этим в статье отражено решение задачи совершенствования методики водного баланса речного бассейна на примере водного баланса р. Волги в части определения трудноизмеряемых элементов водного баланса – таких, как суммарное испарение с поверхности суши водосборов и изменение бассейновых влагозапасов. По сути разработана имитационная модель для анализа и оценки межгодового и сезонного колебания элементов водного баланса речного бассейна.

**Цель исследований:** совершенствование методики водного баланса речного бассейна в части трудноизмеряемых элементов водного баланса – таких, как суммарное испарение с поверхности суши и изменение бассейновых влагозапасов.

#### Материалы и методы исследований.

Анализ элементов водного баланса – таких, как атмосферные осадки ( $P$ ), речной сток ( $R$ ), суммарное испарение ( $E$ ) и изменение бассейновых влагозапасов ( $\pm\Delta V$ ), показывает, что для крупных и средних речных бассейнов оценка ЭВБ за многолетний период все еще является трудноразрешимой задачей. В методическом плане речной бассейн рассматривается нами как совокупность различных естественных и антропогенных измененных ландшафтов, каждый из которых вносит свой качественный и количественный вклад в формирование ЭВБ. При различных режимах увлажнения и антропогенных нагрузок на речной ландшафт происходит перестройка структуры водного баланса территории. Различные

сочетания климатических и не климатических факторов, включая антропогенные, определяют многообразие реакций формирования речного стока на одни и те же атмосферные осадки. Поэтому для выявления причины межгодовой и сезонной (весеннее половодье и межень) изменчивости ЭВБ необходимо выполнение сопряженного ретроспективного анализа основных ЭВБ, и на этой основе – построение уравнений взаимосвязи, позволяющих дать оценку (прогноз) притока речных вод в замыкающем створе речного бассейна.

На сегодняшний день наиболее точно определяемым элементом водного баланса речного бассейна, независимо от его размера, является речной сток. Следующим элементом являются атмосферные осадки, определяющие величину и характер увлажнения речного бассейна, которые можно определить инструментальными наблюдениями.

Широкое распространение получил подход к определению суммарного испарения с использованием лишь данных по стоку и осадкам, при котором осуществляется его оценка по разности суммарных атмосферных осадков и речного стока. Этот подход часто применяется при оценке среднесезонных величин годового суммарного испарения с допущением того, что изменение бассейновых влагозапасов для средних и крупных речных бассейнов за длительный период времени приближается к нулю. Поскольку изменение бассейновых влагозапасов в конкретные годы и в целом за год, а тем более за сезон, месяц, декаду или сутки, в реальности отличается от нуля, то при таком подходе можно получить значительные погрешности. В связи с этим в статье рассматривается математический подход для оценки суммарного испарения и изменения бассейновых влагозапасов [6-8].

Рассмотрим уравнение водного баланса речного бассейна как

$$P_i + \Delta V_i = R_i + E_i, \quad (1)$$

где  $P_i$ ,  $\Delta V_i$ ,  $R_i$ ,  $E_i$  – соответственно годовые осадки, изменение бассейновых влагозапасов, сток и испарение. Тогда

$$P_i - R_i = E_i - \Delta V_i, \quad (2)$$

то есть разность осадков и стока дает величину испарения, уменьшенную в случае сработки бассейновых влагозапасов  $+\Delta V_i$  и увеличенную при накоплении  $-\Delta V_i$ . Если принимать речной сток в качестве результирующего водного баланса бассейна, то разность  $P_i - R_i$  можно рассматривать как затраты осадков в пределах речного бассейна. Однако этот подход можно применять лишь для испарения в первом приближении. Поэтому целесообразно рассмотреть другие



возможные подходы к оценке суммарного испарения речного бассейна.

Из уравнения (1) следует, что при  $\Delta V_i = 0$

$$P_i = R_i + E_i \quad (3)$$

Допустим, что  $E_i = 0$ , то есть осадки формируют сток и влагозапасы бассейна. Тогда

$$P_i + \Delta V_i = R_i \quad (4)$$

и при  $\Delta V_i = 0, P_i = R_i$ .

Чтобы определить  $\Delta V_i$  по известным  $P_i$  и  $R_i$ , необходимо учитывать зависимость  $R_{ip} = f(P_i)$ , по которой определяем  $\Delta V_i$ :

$$\Delta V_{iR} = \pm(R_i - R_{ip}), \quad (5)$$

где знак «плюс» соответствует сработке бассейновых влагозапасов, а знак «минус» – их накоплению;  $\Delta V_{iR}$  – изменение бассейновых влагозапасов, участвующих в формировании стока года (влагозапасов по стоку).

Аналогично, приняв  $R_i = 0$ , получим

$$\Delta V_{iE} = \pm(E_i - E_{ip}), \quad (6)$$

где  $E_{ip} = f(P_i)$  при  $\Delta V_i = 0$ , а  $\Delta V_{iE}$  – изменение влагозапасов, участвующих в формировании испарения  $i$ -го года или влагозапасов по испарению.

Таким образом, при одновременном протекании в бассейне процессов стока и испарения уравнение водного баланса (1) примет следующий вид:

$$P_i + \Delta V_{iR} + \Delta V_{iE} = R_i + E_i; \quad (7)$$

$$\Delta V_i = \Delta V_{iR} + \Delta V_{iE}. \quad (8)$$

Как видим из уравнения (8), бассейновые влагозапасы подразделяются по их участию в формировании стока и испарения. Также из уравнения (8) следует, что

$$\Delta V_i = \Delta V_{iR} \begin{cases} 0, & \text{при } \Delta V_{iR} = \Delta V_{iE} = 0 \\ 0, & \text{при } \pm \Delta V_{iR} = \mp \Delta V_{iE} \\ \Delta V_{iR} + \Delta V_{iE} \end{cases} \quad (9)$$

Принимая во внимание уравнения (5) и (6) для определения  $\Delta V_{iR}$  и  $\Delta V_{iE}$  по известным  $P_i, R_i, E_i$ , необходимо установить зависимости, соответствующие

$$R_{i0} = f(P_i), \quad E_{i0} = f(P_i) \quad (10)$$

равновесному состоянию бассейновых влагозапасов, то есть при  $\Delta V_i = 0$ . В качестве таких зависимостей рассматривались одно- и многофакторные уравнения регрессии  $R_{i0} = f(P_i), E_{i0} = f(P_i), R_{i0} = k_{R_{cp}} P_i$  и  $E_{i0} = (1 - k_{R_{cp}}) P_i$ , где  $k_{R_{cp}}$  – среднее многолетний коэффициент годового стока, связь равнообеспеченных значений стока и осадков.

Учитывая тот факт, что в обычных условиях равновесное состояние влагозапасов в бассейне является нестабильным, сложно определить такого рода зависимость. Поэтому принимается гипотеза о том, что существует такое состояние равновесия гидрологической системы речного бассейна, при котором осадки участвуют в равной степени в формировании стока и испарения. Соответственно этому принимается, что

$$\left. \begin{aligned} R_i &= E_i \\ k_{iR} &= k_{iE} = 0.50 \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Тогда

$$\left. \begin{aligned} [\Delta V_{iR}] &= R_i - [R_i], \\ [\Delta V_{iE}] &= E_i - [E_i] \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

$$\left. \begin{aligned} [R_i] &= [E_i] = 0.50 P_i \\ [\Delta V_i] &= [\Delta V_{iR}] + [\Delta V_{iE}] \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

При преобладании стока над испарением ( $k_R > 0.5$ ) «испаряется» то, что не успело «стечь», а при  $k_R < 0.5$  «стекает» то, что не успело «испариться». При известных  $P_i, R_i, E_i, \Delta V_i$  определение изменения влагозапасов по стоку и по испарению  $[\Delta V_{iR}]$  и  $[\Delta V_{iE}]$  определить несложно. В случае, когда известны только  $P_i$  и  $R_i$ , можно определить лишь  $[R_i]$ , а затем –  $[\Delta V_{iR}]$ . В этом случае для оценки  $[\Delta V_{iE}]$  единственным возможным является установление эмпирических зависимостей, связывающих изменение влагозапасов по испарению  $[\Delta V_{iE}]$  с некоторыми определяющими его факторами, прежде всего – метеорологическими. Однако учитывая, что известны лишь  $P_i, R_i$  и  $[\Delta V_{iR}]$ , можно использовать только эти факторы.

Таким образом, для установления зависимости  $[\Delta V_{iE}] = f\{P_i, R_i, [\Delta V_{iR}]\}$  предлагается следующий подход. Для речного бассейна, по которому имеются данные обо всех элементах водного баланса за многолетний период – такие, как  $P_i, R_i, E_i, \Delta V_i$ , в соответствии с уравнениями (11)-(13) определяются ежегодные значения  $[\Delta V_{iR}]$  и  $[\Delta V_{iE}]$ , их статистические параметры (среднее и стандарт), а также коэффициенты взаимной корреляции. По этим данным получим одно- и многофакторные уравнения регрессии вида:

$$[\Delta V_{iE}] = a([\Delta V_{iR}] - [V_{iR}]_{cp}) + b(P_i - P_{cp}) + [V_{iE}]_{cp} \quad (14)$$

Преобразуем уравнение (14), приняв  $[\Delta V_{iR}] = [V_{iR}] - [V_{iR}]_{cp}$ ,  $\Delta P_i = P_i - P_{cp}$ , получим уравнение:

$$[\Delta V_{iE}] = a[\Delta V_{iR}] + b\Delta P_i + [V_{iE}]_{cp} \quad (15)$$

где  $[V_{iE}]_{cp} = -[V_{iR}]_{cp}$ , при  $[V_{iR}]_{cp} = 0$ , а  $[V_{iR}]_{cp} = R_{cp} - 0.5P_{cp}$ .

Используя уравнение (15), определяем окончательный вид  $[\Delta V_{iE}]$ , а затем определяем ежегодное испарение:

$$[E_i] = 0.5P_i + [\Delta V_{iE}]. \quad (16)$$

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

$$\eta_{yx}^2 = 1 - \frac{\Delta^{*2}}{\sigma_y^2} = R^2, \quad (17)$$

где  $\Delta^*$  – отклонение расчетного испарения от наблюдаемого;  $\sigma_y$  – среднеквадратическое отклонение наблюдаемого испарения.

Таким образом, получаем окончательный вид уравнения (15), по которому определяется  $[\Delta V_{iE}]$ .

Для практической реализации предлагаемого подхода необходимо оценить параметры уравнения (15), связывающего изменение влагозапасов по испарению с определяющими его факторами – в частности, с изменением влагозапасов по стоку и атмосферными осадками.

Поскольку уравнение (15) 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. 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.

**Результаты и их обсуждение.** Для изучения всего гидрологического цикла, происходящего в речном бассейне, включая изменения во времени и пространстве ЭВБ, 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 ( $\pm \Delta V$ ).

Существующие опорные гидрологические и метеорологические станции позволили организовать длительные временные ряды атмосферных осадков и речного стока для современного климата. Соответственно для организации аналогичных длительных временных рядов суммарного испарения и бассейновых влагозапасов использовалась предложенная нами имитационная модель анализа и оценки многолетнего колебания ЭВБ. С этой целью сформированы применительно к бассейну р. Волги в зоне формирования до г. Волгограда два базовых периода длительных временных рядов атмосферных осадков и речного стока: первый период – 1891/1892-2020/2021 гг. (n=130 лет); второй период – 1914/1915-2020/2021 гг. (n=107 лет). Данные по суммарным атмосферным осадкам получены с использованием данных МЦД (meteo.ru), а в качестве многолетних данных годового и сезонного стока использованы данные АО «Институт Гидропроект». В результате получены достаточно длительные ряды основных элементов водного баланса р. Волги в зоне формирования (табл. 1), которые дали возможность осуществить сопряженный ретроспективный анализ ЭВБ.

Как следует из данных таблиц 1, 2 и рисунка, в колебаниях годовых составляющих водного баланса наблюдается свойственное всем гидрометеорологическим характеристикам чередование аномальных лет и их групп (по атмосферным осадкам повышенных и пониженных интервалов валовой увлажненности территории, по речному стоку маловодных и многоводных лет и их групп). Так, в колебаниях годовых атмосферных осадков наблюдаются синхронный характер и тенденция повышения атмосферных осадков в начале XX в., с 1914/1915 до 1929/1930 гг. (первый интервал), и последней четверти XX в., 1978/1979-2001/2002 гг. (второй интервал).

Среднемноголетние величины атмосферных осадков в указанных интервалах составляют, соответственно, 699 и 696 мм/год при климатической норме 665 мм/год (табл. 2). Эти же интервалы характеризуются повышенной водностью и среднемноголетними значениями стока: 205 мм/год (279 км<sup>3</sup>/год) и 210 мм/год (286 км<sup>3</sup>/год) при норме речного стока в базовый период 189 мм/год (257 км<sup>3</sup>/год). Анализ величины испарения этих интервалов показывает, что испарение колеблется близко к климатической норме, которая составляет 476 мм/год (табл. 1).

Как следует из рисунка 1, изменение бассейновых влагозапасов в первом интервале имеет симметричный характер, то есть наполнение и сработка являются примерно одинаковыми.

**Таблица 1. Осредненные по пятилетним значениям годовые ЭВБ бассейна р. Волги в зоне формирования до г. Волгограда за период 1891/1892-2020/2021 гг.**

**Table 1. Five-year averaged annual EWB of the Volga River basin in the formation zone up to Volgograd for the period 1891/1892-2020/2021**

Периоды Periods	Элементы водного баланса, мм/год Water balance elements, mm / year			
	P	R	E	$\pm\Delta V$
1891/1892-1895/1896	675	188	486	-2
1896/1897-1900/1901	634	176	476	18
1901/1902-1905/1906	673	184	490	1
1906/1907-1910/1911	667	169	511	14
1911/1912-1915/1916	710	194	499	-17
1916/1917-1920/1921	662	198	460	-5
1921/1922-1925/1926	681	178	506	3
1926/1927-1930/1931	717	230	444	-44
1931/1932-1935/1936	648	167	501	21
1936/1937-1940/1941	557	131	500	74
1941/1942-1945/1946	673	181	496	4
1946/1947-1950/1951	650	201	445	-4
1951/1952-1955/1956	657	177	492	11
1956/1957-1960/1961	690	201	474	-15
1961/1962-1965/1966	649	185	471	8
1966/1967-1970/1971	623	187	450	14
1971/1972-1975/1976	591	169	458	36
1976/1977-1980/1981	718	205	486	-27
1981/1982-1985/1986	692	205	469	-19
1986/1987-1990/1991	742	210	495	-37
1991/1992-1995/1996	675	222	428	-26
1996/1997-2000/2001	653	188	469	5
2001/2002-2005/2006	661	202	451	-7
2006/2007-2010/2011	624	181	461	18
2011/2012-2015/2016	683	184	497	-2
2016/2017-2020/2021	690	201	473	-16
<b>Средний / Average</b>	<b>665</b>	<b>189</b>	<b>476</b>	<b>0</b>

**Таблица 2. Выборочные оценки статистических параметров временных рядов элементов водного баланса р. Волги в зоне формирования у г. Волгограда (с. Дубовка), мм/год, за период 1891/1892-2020/2021 гг.**

**Table 2. Selective estimates of statistical parameters of time series of the Volga River water balance elements in the formation zone near Volgograd (Dubovka village), mm/year, for the period 1891/1892-2020/2021**

Периоды Periods	Кол-во лет Years	Статистические параметры / Statistical parameters								
		$P_{cp}$	$\sigma_P$	$C_v$	$R_{cp}$ (В %)	$\sigma_R$	$C_v$	$E_{cp}$ (В %)	$\sigma_E$	$C_v$
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

Во втором интервале преимущество имеет процесс наполнения бассейновых влагозапасов.

Ниже приводим данные о преимуществе предлагаемого нами имитационного метода.

В моделях общей циркуляции атмосферы и океана осуществляется оценка изменения глобальной (региональной) приземной температуры воздуха, а также атмосферных осадков и испарения. Оценка же речного стока при этом, как правило, осуществляется по разности осадков и испарения [9]. Однако такой подход является справедливым лишь для достаточно продолжительных периодов времени (30-50 лет), а при стоке отдельных лет, особенно экстремальных по водности, он может привести к существенным погрешностям вследствие недоучета характера и величины изменения бассейновых влагозапасов. Поскольку для экстремально маловодного 1937/1938 года при осадках 585 мм/год и испарении 543 мм/год оценка годового стока р. Волги по их разности составляет 42 мм/год, тогда как условно-естественный сток этого года равен 117 мм/год, то есть расчетный сток почти в 2 раза меньше фактического. В реальных условиях имеет место сработка бассейновых влагозапасов 75 мм/год.

Как видим из данных таблиц 1, 2 и рисунка, в многолетних колебаниях годовых объемов стока р. Волги в зоне формирования до г. Волгограда выделяется длительный маловодный период. В этом периоде можно выделить два периода: с 1930/1931 до 1945/1946 гг. – катастрофически маловодный, который характеризуется уменьшением стока до 160 мм/год (218 км<sup>3</sup>/год); с 1946/1947 по 1977/1978 гг. – умеренно маловодный, характеризующийся уменьшением стока до 185 мм/год (252 км<sup>3</sup>/год при климатической норме 257 км<sup>3</sup>/год). Также эти периоды отличаются снижением осадков: первый период – 628 мм/год; второй – 646 мм/год при климатической норме 665 мм/год. В эти периоды,



характеризующиеся уменьшением атмосферных осадков и речного стока в бассейне р. Волги, происходит увеличение суммарного испарения, причем в первом периоде оно является очень большим, составляя 499 мм/год, во втором периоде – 469 мм/год, приближаясь к климатической норме (476 мм/год).

Таким образом, рассмотренный нами период 1891/1892-2020/2021 гг. имеет полный цикл колебаний годовых ЭВБ бассейна р. Волги в зоне формирования до г. Волгограда.

В начале исследуемого периода происходит повышение атмосферных осадков и речного стока, затем наблюдается их длительное понижение, а затем – опять повышение этих элементов водного баланса. В отличие от этих ЭВБ суммарному испарению свойственна тенденция уменьшения.

Анализ распределения атмосферных осадков при формировании речного стока, суммарного испарения и бассейновых влагозапасов показывает, что периоды 1914/1915-1929/1930 гг. и 1978/1979-2001/2002 гг. характеризуются экстремальными повышенными осадками, которые расходуются на формирование речного стока: соответственно 29 и 30%, а на испарение – 68 и 67% атмосферных осадков (табл. 2). При пониженных осадках в периоде 1930/1931-1945/1946 гг. на формирование стока расходуются 25%, а на суммарное испарение – 79% атмосферных осадков.

Проведенный сопряженный ретроспективный анализ изменчивости ЭВБ бассейна р. Волги позволяет сделать вывод о том, что явной причиной формирования маловодья в бассейне р. Волги является такое соотношение тепла и влаги, когда пониженные атмосферные осадки совпадают с повышенными значениями суммарного испарения с поверхности водосборов. При этом обнаруживается четкая закономерность, когда периодам повышенной водности соответствуют периоды повышенных осадков и пониженных значений суммарного испарения, и наоборот, когда периодам пониженной водности соответствуют периоды пониженных осадков и повышенных значений суммарного испарения.

### Выводы

Водные ресурсы Волжского бассейна, составляющие всего около 5% от водных ресурсов всей России, несут на себе огромную

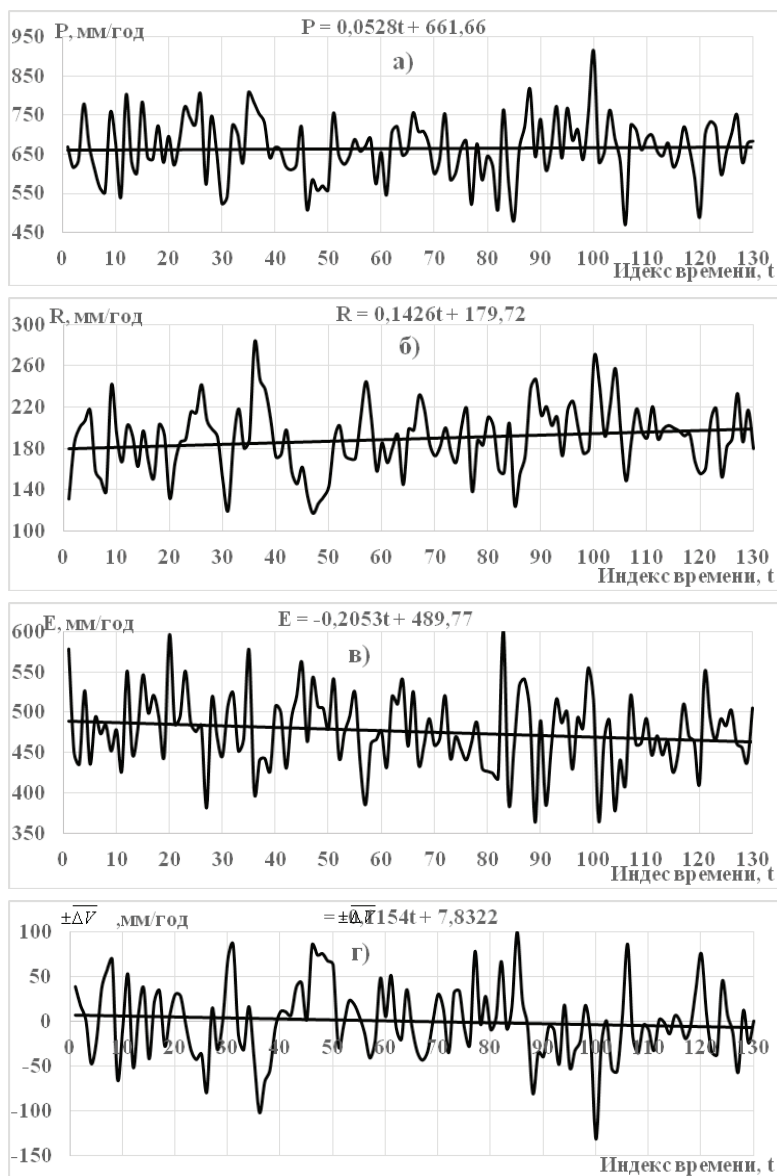


Рис. Многолетние колебания годовых ЭВБ бассейна р. Волги в зоне формирования за период 1891/1892-2020/2021:

- а) атмосферные осадки (P); б) речной сток (R);  
в) суммарное испарение (E);  
г) изменение бассейновых влагозапасов ( $\pm\Delta V$ ).

Для условий современного климата (базовый период):

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

Fig. Long-term fluctuations of annual EWB in the Volga River basin in the formation zone for the period 1891/1892-2020/2021:

- a – atmospheric precipitation (P); b – river flow (R); c) total evaporation (E); d – change of basin moisture content ( $\pm\Delta V$ ).

For the conditions of the modern climate (base period):  $P=665 \text{ mm/year}$ ;  $R=189 \text{ mm/year}$  ( $257 \text{ km}^3/\text{year}$ );  $E=476 \text{ mm/year}$ ;  $\pm\Delta V=0,0 \text{ mm/year}$

антропогенную нагрузку ввиду большой населенности и высокого экономического потенциала этого региона. Устойчивое развитие экономики данного региона во многом определяется рациональным функционированием водохозяйственной системы Волжского бассейна, которое в большей степени зависит от того, насколько достоверно и точно определяются ЭВБ бассейна р. Волги, особенно гидрологические характеристики данного бассейна включая его различные сезоны.

#### Список использованных источников

1. **Бабкин В.И., Вуглинский В.С.** Водный баланс речных бассейнов. Л.: Гидрометеиздат, 1982. 190 с.
2. **Булавко А.Г.** Водный баланс речных водосборов. Л.: Гидрометеиздат, 1972. 304 с.
3. **Бабкин В.И.** Многолетние колебания стока Волги, Оки, Дона, Днепра и методы его прогноза // Известия Российской академии наук. Серия «Географическая». М.: Наука, 2008. № 3. С. 92-98.
4. **Бабкин В.И., Воробьев В.Н., Смирнов Н.П.** Динамика стока рек Центрального района России // Метеорология и гидрология. 2007. № 9. С. 80-83.
5. **Болгов М.В., Мишон В.М., Синцова Н.И.** Современные проблемы оценка водных ресурсов и водообеспечения. М.: Наука, 2005. 317 с.
6. **Исмайылов Г.Х., Федоров В.М.** Межгодовая изменчивость и взаимосвязь элементов водного баланса бассейна р. Волги // Водные ресурсы. 2008. Т. 35, № 3. С. 259-276.
7. **Исмайылов Г.Х., Мурашченкова Н.В., Исмайылова И.Г.** Методика оценки сложноформируемых элементов водного баланса (суммарного испарения и влагозапасов) речного бассейна // Природообустройство. 2020. № 5. С. 88-95.
8. **Исмайылова 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. Уфа: НИЦ «Вестник науки», 2023. С. 29-38.
9. **Бэйтес Б.К., Кундцевич З.В., Саохон У., Палютикоф Ж.П.** (ред.). Изменение климата и водные ресурсы. Технический документ Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК). Женева, 2008. 228 с.

#### Критерии авторства / Authorship criteria

Исмайылова И.Г., Раткович Л.Д. выполнили теоретические исследования, на основании которых провели обобщение и написали рукопись.

Исмайылова И.Г., Раткович Л.Д. имеют на статью авторское право и несут ответственность за плагиат.

#### Конфликт интересов / Conflict of interest

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. /

#### Вклад авторов / Contributions of the authors

Все авторы сделали равный вклад в подготовку публикации.

All authors made an equal contribution to the preparation of the publication.

Поступила в редакцию / Received 07.05.2023

Поступила после рецензирования / Revised 17.08.2023

Принята к публикации / Accepted 28.08.2023

По имеющимся экспериментальным данным гидрометеорологических наблюдений, наиболее достоверно из ЭВБ определяются атмосферные осадки и речной сток. Другие ЭВБ – такие, как суммарное испарение и изменение бассейновых влагозапасов, являются сложно измеряемыми. Предлагаемая методика создает научную базу для нового подхода к анализу и оценке многолетнего и сезонного колебаний и взаимосвязи ЭВБ среднего и крупного речного бассейна – в частности, ЭВБ бассейна р. Волги.

#### References

1. **Babkin V.I., Vuglinsky V.S.** Water balance of river basins. L.: Gidrometeoizdat, 1982. 190 p.
2. **Bulavko A.G.** Water balance of river watersheds. L.: Gidrometeoizdat, 1972. 304 p.
3. **Babkin V.I.** Long-term fluctuations of the flow of the Volga, Oka, Don, Dnieper and methods for its forecasting. // Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Theseriesisgeographical. Moscow, Nauka Publ., 2008. № 3. P. 92-98.
4. **Babkin V.I., Vorobyov V.N., Smirnov N.P.** Dynamics of runoff of rivers in the Central region of Russia. Meteorologyandhydrology. 2007. No. 9. P. 80-83.
5. **Bolgov M.V., Michon V.M., Sintsova N.I.** Modern problems of assessment of water resources and water supply. M.: Nauka, 2005. 317 p.
6. **Ismayylov G.Kh., Fedorov V.M.** Interannual variability and relationship between the elements of the water balance of the basin of the river. Volga. Water resources, 2008. V. 35. No. 3. P. 259-276.
7. **Ismayylov G.Kh., Murashchenkova N.V., Ismayylova I.G.** Methodology for assessing complexly formed elements of the water balance (total evaporation and moisture reserves) of the river basin. Prirodoobustroistvo. 2020. No. 5. P. 88-95.
8. **Ismayylova I.G.** Modeling of the elements of the water balance of the basin of the river Volga to create an information-analytical hydrometeorological database. Fundamental and applied aspects of the development of modern science/ Collection of works based on the materials of the XII International Research Competition. Ufa: Ed. Scientific Research Center Bulletin of Science, 2023. P. 29-38
9. **Bates B.K., Kundtsevich Z.V., Saohon U., Palutikof J.P.** (eds.) Climate change and water resources. Technical document of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Geneva, 2008. 228 s.

Ismaylova I.G., Ratkovich L.D. Performed theoretical research, on the basis of which they generalized and wrote the manuscript.

Ismaylova I.G., Ratkovich L.D. have copyright on the article and are responsible for plagiarism.