

УДК 551.480+551.583.13

## ВОДНЫЙ БАЛАНС ПРИРОДНЫХ ЗОН БАССЕЙНА р. ВОЛГИ В РАЗНЫЕ ПО ВОДНОСТИ ФАЗЫ МНОГОЛЕТНЕГО ПЕРИОДА\*

© 2013 г. С.В. Ясинский

*Институт географии РАН*

Поступила в редакцию 18.05.2012 г.

Разработана методика расчета элементов водного баланса и его структурных коэффициентов для природных зон и всего бассейна р. Волги в маловодные и многоводные фазы многолетнего периода. Приведены карты распределения элементов водного баланса в эти фазы в отклонениях от средних многолетних величин для субъектов РФ, расположенных на территории волжского бассейна. Оценка методики показала, что с наибольшей точностью она позволяет рассчитывать элементы водного баланса для лесной и с меньшей – для лесостепной природных зон. Для степной зоны необходимо уточнение параметров для расчета испарения с больших территорий за достаточно продолжительный период.

Изучению природных условий и водных ресурсов бассейна р. Волги, различных аспектов хозяйственной деятельности и характеристике антропогенной нагрузки на ее водосбор, качеству воды самой реки, ее наиболее крупных притоков и 11 водохранилищ посвящена обширная литература, в значительной степени обобщенная в фундаментальных монографиях [8–10, 27, 28]. Особенное внимание было уделено исследованию многолетних колебаний речного стока, что обусловлено его определяющим влиянием на изменение уровня Каспийского моря [2, 18, 21, 26, 29]. В значительно меньшей степени изучена структура водного баланса бассейна, то есть соотношения между составляющими его элементами (осадками, испарением, инфильтрацией, подземным и поверхностным речным стоком). Исчерпывающие сведения о средних многолетних значениях элементов водного баланса, осредненных по субъектам РФ, полностью или частично расположенных в бассейне Волги, содержатся в [7].

Со времени выхода в свет этой работы прошло уже 45 лет и полученные в ней данные могли несколько измениться в связи с изменением климата, ландшафтной структуры водосбора под влиянием хозяйственной деятельности и удлинения рядов наблюдений за элементами водного баланса. Однако в связи с тем, что рассматриваются осредненные за многолетний период элементы водного баланса, можно полагать, что эти

изменения в приведенных данных будут не столь существенны. Кроме того, поскольку никаких новых обобщений по этому вопросу пока не сделано, приведенные в данной работе сведения являются, по существу, единственным источником информации о структуре водного баланса Волги и других крупных речных бассейнов РФ.

В [20] за аналогичный многолетний период (с конца 1890-х до начала 1960-х гг. также проведены расчеты водного баланса этого бассейна и разных природных зон Русской равнины, при этом учитывалось более 10 элементов водного баланса. Для всего бассейна Волги осадки составили 662 и 660 мм соответственно, суммарный речной сток в обоих работах составил – 187 мм, то есть результаты расчетов оказались сопоставимыми друг с другом, несмотря на то что получены разными методами.

Можно отметить работы [3, 17, 22, 25], в которых рассматривались результаты анализа различных аспектов многолетних колебаний элементов водного баланса, осредненные для всего бассейна р. Волги. Однако, как известно, вся территория бассейна Волги расположена в пяти природных зонах, характеризующихся собственными режимами тепла и влаги, которые определяют не только природные условия этих территорий, но и характер хозяйственной деятельности.

С начала надежных наблюдений (1881 г.) в многолетних колебаниях речного стока Волги в замыкающем створе г. Волгограда четко выделяются три различные по водности фазы, обусловленные

\* Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 12-05-00838).

**Таблица 1.** Характеристики стока в разных по водности фазах многолетнего периода в замыкающем створе р. Волги – г. Волгоград\*

Фаза водности	Период, годы	Длительность, число лет	Объем стока, $W$ км <sup>3</sup>	Расход, $Q$ м <sup>3</sup> /сек	Слой стока, мм
средняя	1881–1928	48	258.6	8190	190
маловодная	1929–1977	47	240.8	7625	177
многоводная	1978–2009	31	280	8857	205

\* Слой стока рассчитан при площади бассейна Волги 1360 тыс. км<sup>2</sup> [7].

асинхронностью формирующих его воднобалансовых процессов [32]. Основные характеристики речного стока в этих фазах приведены в табл. 1.

В результате важной особенностью многолетних колебаний годового стока Волги, отличающей его от “белого шума”, является цикличность, то есть тенденция к группировке лет повышенной (пониженной) водности без устойчивой периодичности процесса [16]. При этом вклад абсолютно непредсказуемого “белого шума” в дисперсию многолетних колебаний стока превышает 84%, что свидетельствует о невозможности статистического прогнозирования стока Волги даже на один год вперед [21].

Многолетние колебания стока Волги происходили при различных температурных условиях. При потеплении на 1 °С естественный сток Волги уменьшался в среднем на 5–10%, а при потеплении на 2 °С увеличивался на 15–20% [13]. Однако существует и другое мнение, что при потеплении на 1 °С в целом для бассейна Волги увеличение осадков компенсируется ростом температуры воздуха, и существенного изменения элементов водного баланса в бассейне Волги не происходит [3]. В ряде последних работ содержатся довольно убедительные выводы о том, что современный период увеличения приземной температуры воздуха закончился и ожидается наступление периода похолодания [24, 30, 33].

Значения элементов водного баланса и его структуры в фазы их понижения и повышения за прошедший многолетний период могут служить аналогами их изменений в будущем. Поэтому представляется важным выявление временных и пространственных закономерностей колебаний характеристик водного баланса в разные по водности фазы в различных природных зонах и всего бассейна, что являлось целью данной работы.

**Методика исследований и исходные данные.** Основой методики расчета структуры водного баланса является ранее доказанное положение о том, что в разных частях одной и той же природной зоны Европейской территории России (ЕТР)

фазы повышенных и пониженных значений средних годовых характеристик климата (температуры воздуха и сумм атмосферных осадков) наступают и изменяются практически синхронно [34]. При этом время наступления и колебания рассматриваемых характеристик климата в этих фазах различны для каждой из природных зон.

Из пяти природных зон, в которых расположен бассейн Волги, рассматриваются только три: степная зона была объединена с полупустынной, а в лесную зону объединены зоны смешанных и широколиственных лесов (рис. 1).

**Рис. 1.** Природные зоны бассейна р. Волги и расположение опорных метеорологических станций.

**Таблица 2.** Характеристики среднего многолетнего водного баланса природных зон Волжского бассейна

	слой, мм						коэффициент стока	коэффициент инфильтрации	Доля (%) подземного стока от суммарного
	осадки	сток рек			испарение	инфильтрация			
		суммарный	поверхностный	подземный					
<b>Лесная зона</b>									
Среднее по зоне	694.8	189.4	137.9	51.5	505.4	556.9	0.27	0.8	27.5
$C_v$	0.09	0.25	0.32	0.33	0.07	0.06	0.22	0.07	0.32
<b>Лесостепная зона</b>									
Среднее по зоне	618.0	124.3	84.3	40.0	493.7	533.7	0.2	0.9	32.3
$C_v$	0.06	0.28	0.28	0.47	0.07	0.06	0.26	0.04	0.31
<b>Степная зона</b>									
Среднее по зоне	443.8	45.0	32.3	12.7	398.8	411.5	0.1	0.9	21.2
$C_v$	0.21	0.55	0.61	0.86	0.18	0.20	0.50	0.04	0.82
<b>По всему бассейну</b>									
Среднее взвешенное по бассейну	645.6	157.8	113.9	43.9	487.8	531.7	0.2	0.8	27.8
$C_v$	0.18	0.51	0.58	0.51	0.13	0.13	0.43	0.10	0.41

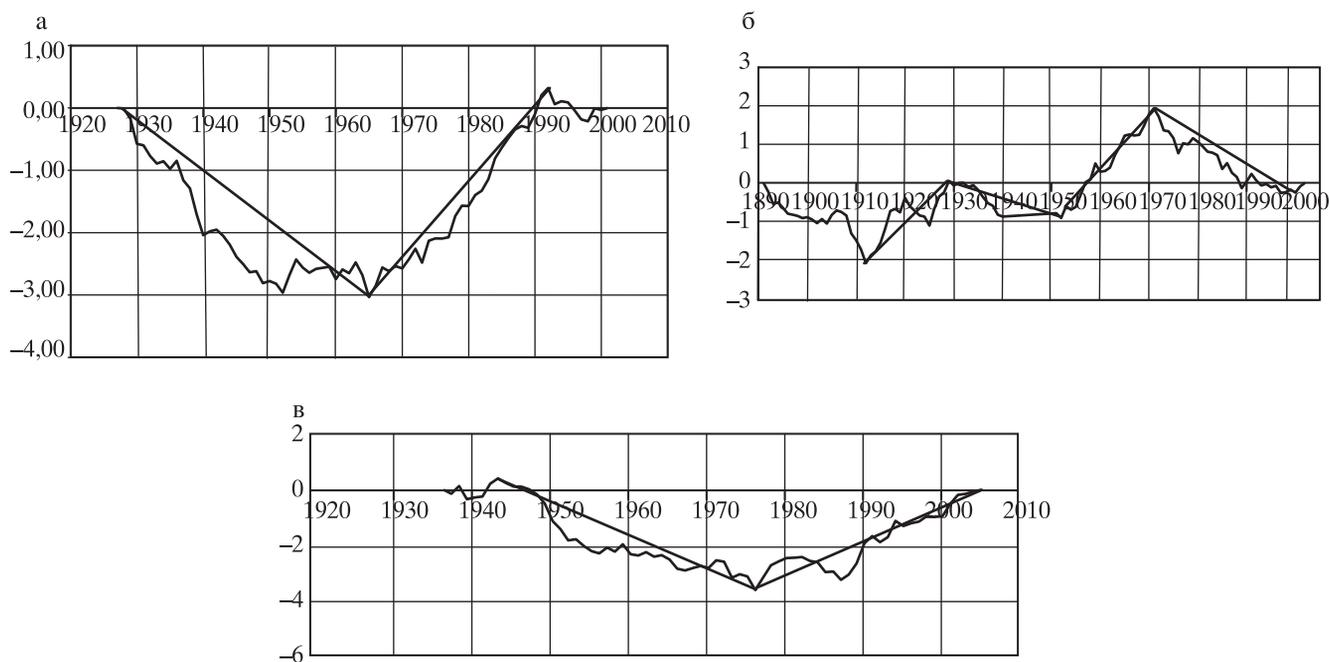
Инфильтрация = осадки – поверхностный сток.

В табл. 2 приведены средние многолетние значения элементов водного баланса, его структурных коэффициентов и коэффициента вариации, осредненные по тем субъектам РФ, которые входят в ту или иную рассматриваемую природную зону бассейна Волги, агрегированные по данным [7]. В лесную зону были включены данные по 22 субъектам РФ, в лесостепную – по 8, в степную – по 5 субъектам, полностью, либо большей своей частью, входящим в бассейн Волги. Субъекты РФ, расположенные на окраинах ее бассейна, не рассматривались. Расчет водного баланса для всего бассейна Волги осуществлялся с учетом доли площади той или иной природной зоны. При этом принято, что лесная зона занимает 70%, лесостепная и степная – по 15% его территории. Оценка точности расчета осуществлялась для средних многолетних осадков и суммарного речного стока (величины остальных элементов водного баланса рассчитываются) путем сравнения с данными, имеющимися в литературе. Абсолютные отклонения результатов расчета осадков, полученные в данной работе и в [7], составляют 21.7 мм, суммарного стока – 38.8 мм. Относительные отклонения расчета осадков – 3.0%, суммарного стока – 20%, что представляется приемлемым.

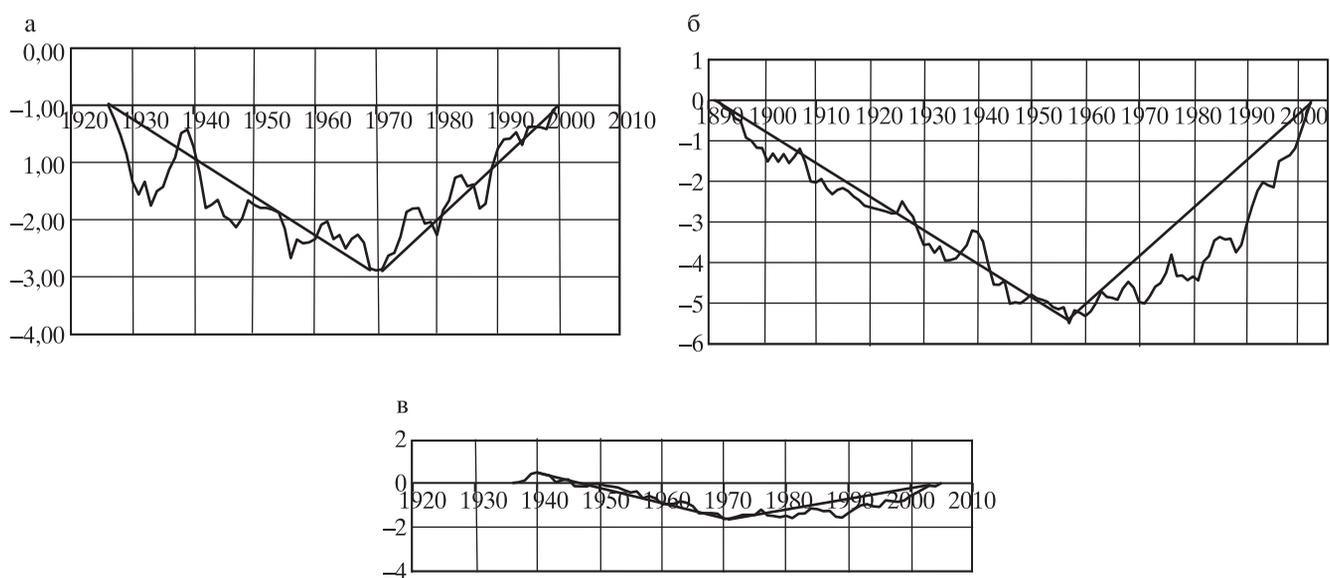
Анализ приведенных данных показывает, что наименьшие значения коэффициента вариации присущи осадкам и испарению, наибольшие – речному стоку, что обусловлено не только ха-

рактеристиками климата, но в большей степени различиями в рельефе, почве и другими физико-географическими характеристиками водосборов в этих зонах, влияющими на процесс трансформации осадков в речной сток. Низкие значения коэффициента вариации осадков в пределах каждой из природных зон бассейна Волги еще раз подтверждают вывод о возможности распространения данных об их многолетних колебаниях, характерных для одной части рассматриваемой части этой зоны бассейна на другие части ее территории. В этой связи в каждой из рассмотренных природных зон были выбраны опорные метеостанции с длительными рядами наблюдений (м/с Новый Иерусалим, м/с г. Пенза, м/с г. Волгоград – СХИ соответственно) (рис. 1), по средним годовым данным которых построены разностно интегральные кривые осадков и температуры воздуха, на которых четко выделяются маловодные и многоводные фазы (рис. 2, 3). Для каждой опорной метеостанции рассчитывались средние значения сумм осадков и сумм температур за весь период наблюдений, маловодную и многоводную фазы.

Для подтверждения вывода о репрезентативности данных опорных метеостанций был проведен также расчет коэффициентов корреляции между средними годовыми значениями рассматриваемых показателей климата на этих метеостанциях и метеостанциях, расположенных на значительном



**Рис. 2.** Разностно-интегральные кривые сумм осадков на опорных метеорологических станциях в бассейне р. Волги: а – лесная зона, м/с Новый Иерусалим; б – лесостепная зона, м/с Пенза; в – степная зона, м/с Волгоград – СХИ.



**Рис. 3.** Разностно-интегральные кривые температуры воздуха на опорных метеорологических станциях в бассейне р. Волги: а – лесная зона, м/с Новый Иерусалим; б – лесостепная зона, м/с Пенза; в – степная зона, м/с Волгоград – СХИ.

удалении от них в пределах каждой из рассматриваемых природных зон. Для южной части лесной зоны были использованы ряды средних годовых осадков и температуры воздуха по 31 метеостанции, для лесостепной – по 30, для степной – по 34. Во всех природных зонах очень высокая корреляция характерна для средней годовой температуры воздуха. Средний коэффициент корреляции равен  $r_{Срз}^0 = 0.96$ . Несколько меньший, но также доста-

точно высокий коэффициент корреляции присущ и средним годовым осадкам, в среднем для всех природных зон  $r_{Срз}^0 = 0.67$  [34].

*Расчет осадков в разные по водности фазы для субъектов РФ в бассейне Волги.* Средние многолетние величины сумм осадков в различные по водности фазы для каждого субъекта РФ вычислялись с использованием переходных коэффициентов. Ими являлись отношения средней много-

летней величины осадков для каждого субъекта РФ, расположенного в той или иной природной зоне бассейна Волги, приведенные в [7], к среднему многолетнему значению осадков на соответствующей опорной метеостанции. Рассчитанные коэффициенты затем умножались на среднее значение осадков в маловодные и многоводные фазы на опорных метеостанциях и вычислялась средняя многолетняя величина осадков в эти фазы для каждого субъекта РФ в каждой природной зоне:

$$\begin{aligned} K_{oc} &= P_{cb}/P_{op}, \\ P_{cb,мн} &= K_{oc} \cdot P_{оп,мн}, \\ P_{cb,мл} &= K_{oc} \cdot P_{оп,мл}, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $P_{cb}$  – средняя многолетняя годовая сумма осадков в субъекте РФ,  $P_{op}$  – средняя многолетняя годовая сумма осадков на опорной метеостанции;  $P_{оп,мн}$  ( $P_{оп,мл}$ ) – среднее многолетнее количество осадков за многоводную (маловодную) фазу на опорной метеостанции. Средние, максимальные и минимальные значения переходных коэффициентов  $K_{oc}$  для рассматриваемых природных зон приведены в табл. 3.

*Расчет испарения для субъектов РФ в бассейне Волги в разные по водности фазы.*

В настоящее время для расчета испарения для достаточно большой территории и за достаточно продолжительные промежутки времени широко используется уравнение Э.М. Ольдекопа, отра-

жающее связь средних многолетних годовых величин суммарного испарения  $E_c$ , испаряемости  $E_0$  и осадков  $P$  (все величины выражены в мм слоя воды):

$$E_c/E_0 = [1 + (P/E_0)^n]^{-1/n}, \quad (2)$$

где  $n = 2.5$ .

Наиболее полное научное обоснование применимости уравнения (2) для прогноза полного речного стока, включающего его поверхностную и подземную составляющие, под влиянием возможных изменений климата дано в [4]. В [11, 15] показано, что результаты расчетов среднего многолетнего суммарного испарения по уравнению (2) близки к оценкам этого элемента водного баланса по другим известным аналогичным формулам (П. Шрайбера, М.И. Будыко, В.С. Мезенцева). Однако привлекательность данного уравнения и его модификаций [17] заключается в том, что установлена тесная связь между испаряемостью  $E_0$  (максимально возможным испарением) и суммой средних суточных положительных температур воздуха  $\sum t > 0$ , полученная путем расчетов по уравнениям полуэмпирической теории испарения по данным 78 метеостанций, равномерно расположенных на территории ЕТР [4]:

$$E_0 = a \sum t > 0, \quad (3)$$

где  $a = 0.29$  мм/°С.

**Таблица 3.** Средние, максимальные и минимальные значения переходных коэффициентов  $K_{oc}$

Природная зона	Среднее для зоны	Максимальное (субъект РФ)	Минимальное (субъект РФ)
южная часть лесной	1.2	1.42 Вологодская	1.01 Рязанская, Свердловская
лесостепная	1.11	1.23 Орловская	1.02 Ульяновская
степная	1.21	1.40 Самарская	0.77 Астраханская

**Таблица 3а.** Средние, максимальные, минимальные значения переходных коэффициентов  $K_t$

Природная зона	Среднее для зоны	Максимальное (субъект РФ)	Минимальное (субъект РФ)
южная часть лесной	0.98	1.16 Рязанская	0.8 Свердловская
лесостепная	0.97	1.17 Пензенская	0.87 Челябинская
степная	0.91	1.03 Волгоградская	0.79 Оренбургская

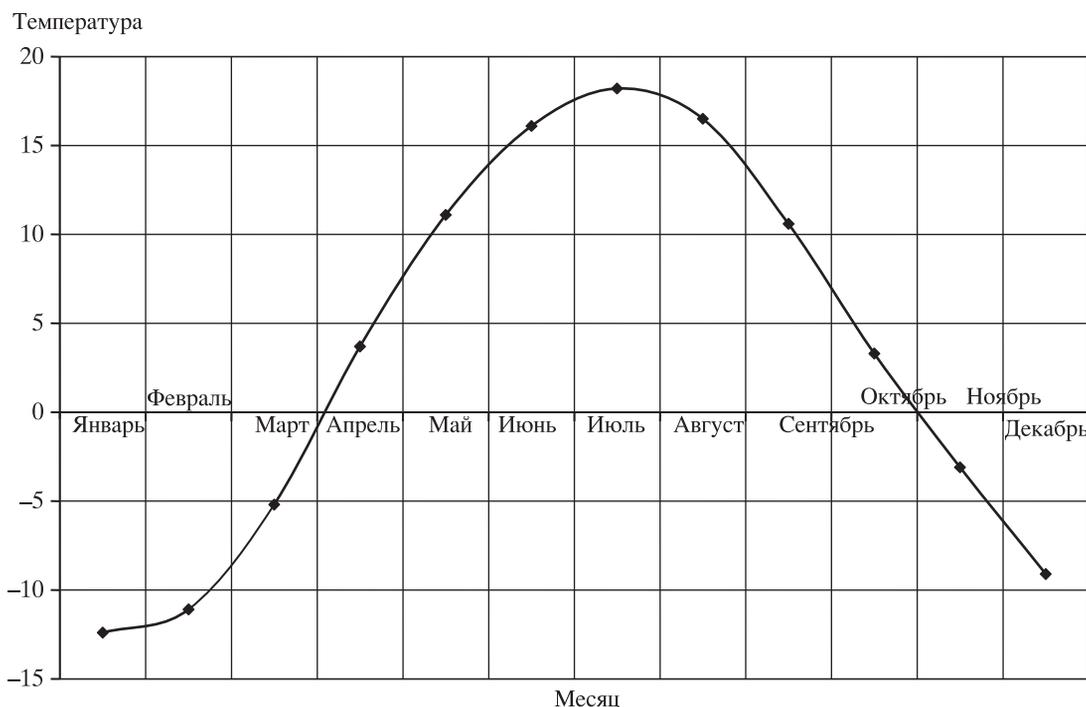


Рис. 4. Внутригодовой ход температуры воздуха в Ивановской области.

Поскольку в зимний период разность между испарением и конденсацией в условиях ЕТР мало отличается от ошибок измерения зимних осадков, можно полагать, что оценка  $E_0$  только за теплый период является ее характеристикой для всего года. Доступность данных о средних суточных температурах воздуха, измеряемых на всех метеостанциях, обусловило применение уравнения (2) не только для прогноза средней многолетней величины испарения для больших территорий и среднего многолетнего речного стока при возможных колебаниях климата [5, 17, 31], но и для решения некоторых экологических задач [6, 19].

Для расчета сумм средних суточных положительных температур воздуха необходимо знать длительность теплого периода, которая для различных территорий бассейна Волги может различаться на 10–20 суток [15]. Для получения величин этих температур в субъекте РФ использовался подход, аналогичный оценке осадков в разные по водности фазы. По данным о средних месячных многолетних температурах воздуха в каждом субъекте РФ [23] строились графики ежегодного хода температуры (рис. 4).

За значение ежегодной многолетней суммы положительных температур бралась площадь графика выше нулевого значения температуры. Данный способ учитывал фактическую длительность периода с положительными средними су-

точными температурами в каждом субъекте РФ. Далее рассчитывались отношения этой суммы к сумме положительных температур, полученных для соответствующей опорной метеостанции. Эти отношения, как и в случае с осадками, были переходными коэффициентами от этой метеостанции к каждому субъекту РФ:

$$\begin{aligned}
 K_t &= t_{сб}/t_{оп}, \\
 t_{сб.мн} &= K_t \cdot t_{оп.мн}, \\
 t_{сб.мл} &= K_t \cdot t_{оп.мл}
 \end{aligned}
 \quad (4)$$

где  $t_{сб}$  – средняя многолетняя сумма положительной температуры воздуха в субъекте РФ,  $t_{оп}$  – средняя многолетняя сумма положительной температуры воздуха на опорной метеостанции;  $t_{оп.мн}$  ( $t_{оп.мл}$ ) – средняя многолетняя сумма положительной температуры воздуха за многоводную (маловодную) фазу на опорной метеостанции. Средние, максимальные и минимальные значения переходных коэффициентов  $K_t$  в каждой из природных зон рассматриваемого бассейна приведены в табл. 4.

Переходные коэффициенты, полученные для каждого субъекта РФ, умножались на значение суммы положительных суточных температур на опорной метеостанции за многоводную и маловодную фазы. В результате для каждого субъекта РФ бассейна Волги получены величины суммы этих температур для каждой из этих фаз много-

**Таблица 4.** Средние, максимальные, минимальные значения переходных коэффициентов  $K_f$ 

Природная зона	Среднее для зоны	Максимальное (субъект РФ)	Минимальное (субъект РФ)
южная часть лесной лесостепная	0.98	1.16 Рязанская	0.8 Свердловская
	0.97	1.17 Пензенская	0.87 Челябинская
степная	0.91	1.03 Волгоградская	0.79 Оренбургская

**Таблица 5.** Годовые средние многолетние температуры воздуха в разные по водности фазы в природных зонах бассейна Волги

Природные зоны	Средняя много-летняя °С	Многоводная фаза °С	Маловодная фаза °С
лесная	3.9	4.7	3.7
лесостепная	5.5	6.0	5.0
степная	7.9	8.2	7.6

летнего периода, а расчет испарения проводился по формулам (2, 3).

С использованием этих же переходных коэффициентов  $K_f$  проведен расчет годовых средних многолетних температур воздуха в природных зонах Волжского бассейна в разные по водности фазы. Результаты расчета приведены в табл. 5. Из нее видно, что в многоводную фазу годовая средняя многолетняя температура воздуха была выше, чем в маловодную фазу, примерно в 1.2 раза во всех природных зонах.

*Расчет среднего многолетнего речного и подземного стока в разные по водности фазы.*

Поскольку для каждого субъекта РФ были получены величины средних многолетних осадков и испарения в разные по водности фазы, так называемый “климатический” речной сток для этих регионов рассчитывался по уравнению водного баланса:

$$Y_{сб} = P_{сб} - E_c, \quad (5)$$

где  $Y_{сб}$  и  $P_{сб}$  – суммарный сток и осадки в субъекте РФ.

С учетом данных о доле подземного стока в суммарном, приведенных в [7], были вычислены также значения подземной и поверхностной составляющих полного речного стока в эти фазы для каждого субъекта РФ в каждой природной зоне. Кроме того, были рассчитаны коэффициенты стока ( $K_c = Y/P$ ) и коэффициент увлажнения ( $K_y = P/E_0$ ).

В [20] отмечено, что доля подземного стока в полном речном стоке возрастает с уменьшением водности года и может составлять до 35% в год 95%-ной обеспеченности. Принятое допущение о постоянном значении доли подземного стока в той или иной природной зоне обосновывается тем, что вклад среднего многолетнего подземного стока в общий речной сток невелик и составляет только около 30%. С учетом меньшей чувствительности подземного стока к колебаниям климата, особенно в лесостепной и степной природных зонах, недоучет изменения доли подземного стока в зависимости от водности года или фазы многолетнего периода не мог значительно отразиться на результатах расчета.

Реализация изложенной методики была основана на использовании следующих исходных данных:

1. Средних многолетних данные об элементах водного баланса и его структурных коэффициентах (поверхностного стока и увлажнения, доли подземного стока в суммарном речном стоке) по субъектам РФ [7].
2. Характеристик показателей климата на опорных метеостанциях и речного стока рек за многолетний период на водосборах, расположенных в пределах бассейна Волги и в непосредственной близости от него, сведения о которых приведены в табл. 6.
3. О речном стоке р. Волги – г. Волгоград за более чем 100-летний период с 1881 по 2009 г.

**Таблица 6.** Состав наблюдений на опорных метеорологических станциях и гидрологических постах в бассейне Волги

Лесная зона			
Пункт	Показатель	Характеристика	Годы наблюдений
Метеостанция “Новый Иерусалим”	$t$ °С воздуха	средние месячные	1927–2000
Гидропост на р.Истра – п. Павловская Слобода	осадки, мм	месячные суммы	1927–2000
	слой стока, мм	годовой	1925–1999
Лесостепная зона			
Метеостанция г. Пенза	$t$ °С воздуха	средние месячные	1891–2002
Гидропост на р. Хопер – п. Новохоперск	осадки, мм	месячные суммы	1891–2002
	слой стока, мм	годовой	1939–2003
Степная зона			
Метеостанция “Волгоград – СХИ”	$t$ °С воздуха	средние месячные	1937–2003
Гидропост на р. Иловля – п. Александровка	осадки, мм	месячные суммы	1937–2003
	слой стока, мм	годовой	1930–2003

**Водный баланс природных зон и бассейна Волги в разные по водности фазы.** По изложенной выше методике были проведены расчеты элементов водного баланса и его структурных коэффициентов для каждого субъекта РФ бассейна Волги в разные по водности фазы. Осредненные как средневзвешенные по природным зонам их значения приведены в табл. 7.

Из нее видно, что для лесной зоны увеличение осадков и, как следствие, речного стока в многоводную фазу значительно превышает их уменьшение в маловодную фазу. На это также указывает изменение коэффициента увлажнения, который характеризует то, что в многоводную фазу в этой зоне увеличение осадков приводит к уменьшению испарения. В лесостепной и степной зонах отклонения элементов водного баланса от их средних многолетних значений более равномерно, а увеличение осадков в многоводную фазу в меньшей степени сказывается на уменьшении испарения, чем в лесной зоне.

Расчеты показывают, что во всех природных зонах осадки в многоводную фазу превышают их величину в маловодную фазу примерно в 1.2 раза, испарение и коэффициент увлажнения – также примерно в 1.2 раза, несмотря на различные абсолютные величины этих элементов водного баланса и коэффициентов увлажнения, изменяющиеся по территории бассейна в соответствии с широтной зональностью.

Суммарный речной сток и его составляющие в лесной и лесостепной зонах увеличиваются в многоводную фазу в 1.5 раза. Исключение со-

ставляет степная зона, где общий речной сток по сравнению с другими зонами увеличивается в 2 раза, а подземный в 3 раза, что обусловлено физико-географическими особенностями ее территории и, прежде всего, большой глубиной залегания подземных вод [34].

Для всего бассейна Волги изменения элементов водного баланса и его структурных коэффициентов для маловодных и многоводных фаз, рассчитанных как средневзвешенное для рассматриваемых природных зон, приведены в табл. 8. Приведенные в табл. 7 и 8 данные подтверждают, что каждая из этих фаз в той или иной степени проявляется на всей обширной территории ее бассейна [1].

В целом отмечается следующая закономерность: периодам повышенной водности стока ( $P < 25\%$ ) соответствуют периоды повышенных осадков и пониженных значений испарения. Наоборот, периодам пониженной водности стока ( $P > 75\%$ ) всегда соответствуют периоды пониженных осадков и повышенных значений испарения.

*Оценка точности методики расчета водного баланса природных зон и всего бассейна Волги.*

Оценка точности методики расчета проведена путем сравнения данных о “климатическом” и фактическом суммарном речном стоке в разные по водности (по осадкам) фазы, рассчитанных для тех субъектов РФ, где расположены опорные гидрологические посты. Эти фазы в многолетних колебаниях стока на опорных гидрологических

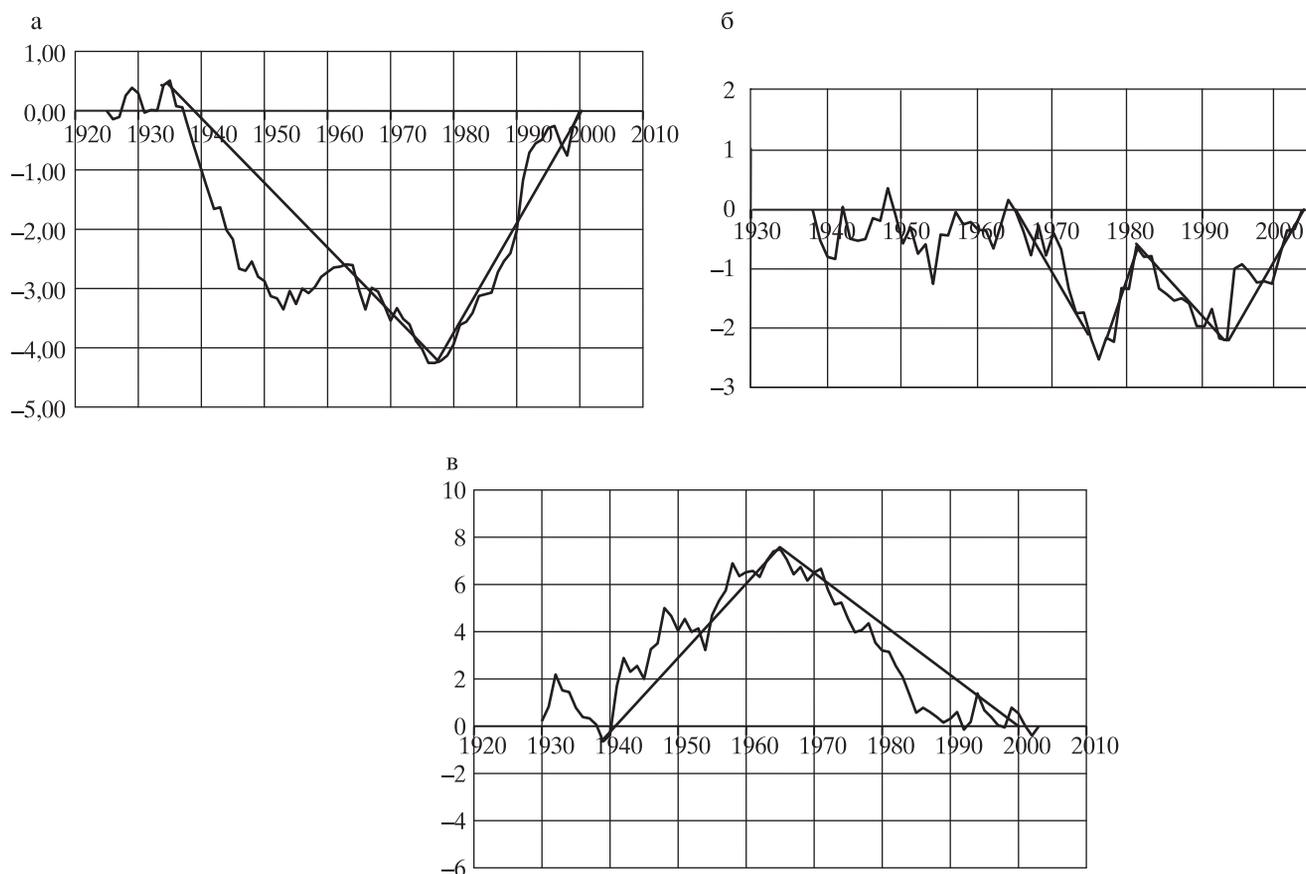
**Таблица 7.** Рассчитанные средние многолетние значения водного баланса и его структурных коэффициентов бассейна Волги для разных по водности фаз, осреднённые по природным зонам

Лесная зона				
	Рассчитанные значения, мм		Отклонение от среднего многолетнего, мм	
	Маловодная фаза	Многоводная фаза	Маловодная фаза	Многоводная фаза
Осадки	641	792	-53.8	97.2
Испарение	479	554	-26.5	48.5
Суммарный сток	162	238	-27.4	48.6
Поверхностный сток	119	179	-18.9	41.1
Подземный сток	43	65	-8.5	13.5
Коэффициент стока	0.25	0.30	-0.02	0.03
Коэффициент увлажнения	0.98	1.17	-0.05	1.14
Лесостепная зона				
	Рассчитанные значения, мм		Отклонение от среднего, мм	
	Маловодная фаза	Многоводная фаза	Маловодная фаза	Многоводная фаза
Осадки	594	734	-24	116
Испарение	506	582	2.3	88.3
Суммарный сток	88	152	-36.3	27.7
Поверхностный сток	60	104	-24.3	19.7
Подземный сток	28	48	-12	8
Коэффициент стока	0.15	0.21	-0.05	0.01
Коэффициент увлажнения	0.76	0.89	-0.05	0.07
Степная зона				
	Рассчитанные значения, мм		Отклонение от среднего, мм	
	Маловодная фаза	Многоводная фаза	Маловодная фаза	Многоводная фаза
Осадки	397	494	-46.8	50.2
Испарение	367	435	-31.8	36.2
Суммарный сток	30	59	-15	14
Поверхностный сток	21	41	-11.3	8.7
Подземный сток	9	18	-3.7	5.3
Коэффициент стока	0.07	0.11	-0.03	0.01
Коэффициент увлажнения	0.43	0.53	-0.05	0.05

**Таблица 8.** Водный баланс бассейна р. Волги в маловодные и многоводные фазы

Элементы водного баланса, мм	фазы		$\Delta = (\mathcal{E}_{\text{мн}} - \mathcal{E}_{\text{мл}})$	$\Delta_1 = \mathcal{E}_{\text{мн}}/\mathcal{E}_{\text{мл}}$
	маловодная	многоводная		
Осадки	597.4	738.7	141.3	1.2
Испарение	466.3	540.4	74.1	1.15
Суммарный сток	131.1	198.3	67.2	1.5
Поверхностный сток	95.5	143.1	51.6	1.5
Подземный сток	35.6	55.2	19.6	1.5
Коэффициент стока	0.15	0.2	0.05	1.3

Э – элемент водного баланса



**Рис. 5.** Разностно-интегральные кривые речного стока на опорных гидрологических постах в природных зонах бассейна р. Волги, *а* – лесная зона, р. Истра – п. Павловская слобода; *б* – лесостепная зона, р. Хопер – п. Новохоперск; *в* – степная зона, р. Иловля – п. Александровка.

постах показаны на рис. 5. Оценка репрезентативности многолетних колебаний речного стока на опорных гидрологических постах и на других реках в соответствующих природных зонах в данной работе не проводилась. Но в [12] приведена карта районирования территории России по синхронности колебаний годового речного стока, в которой на территории ЕТР выделены однородные районы, практически полностью совпадающие с рассматриваемыми природными зонами бассейна Волги. Поэтому с полным основанием можно утверждать, что многолетние колебания речного стока на опорных гидрологических постах, так же, как и осадки, репрезентативны другим рекам той или иной природной зоны этого бассейна.

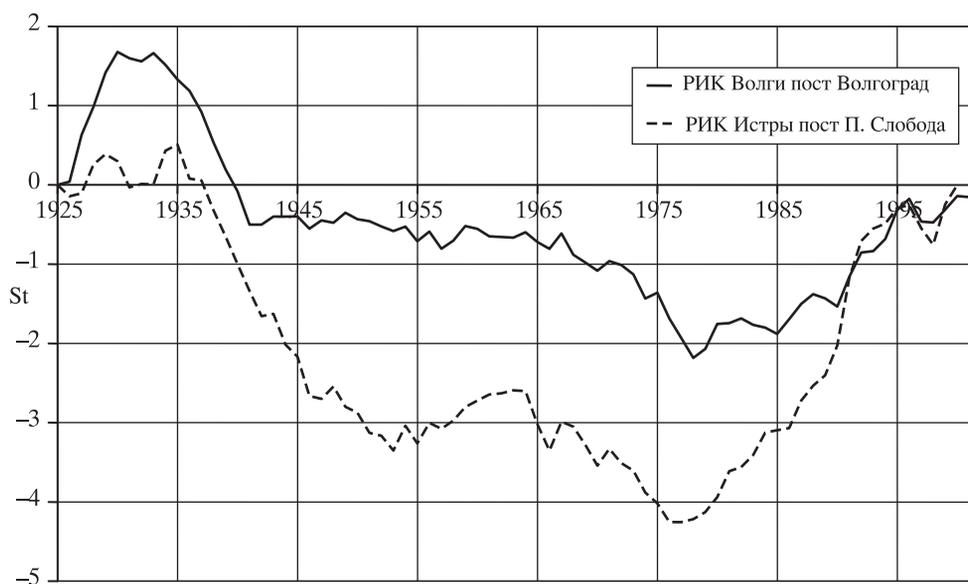
Результаты сравнительных расчетов по оценке точности используемой методики для отдельных природных зон приведены в табл. 9.

Сравнение полученных величин “климатического” и фактического суммарного стока показало, что наиболее удачным оказался расчет для лесной зоны, ошибка которого не превышает 1%.

Одной из причин является, вероятно, высокая степень репрезентативности природных и хозяйственных условий бассейна р. Истры для территории Московской области. Кроме того, в лесной зоне формируется более 80% речного стока р. Волги [14], о чем свидетельствует также хорошее совпадение разностно-интегральных кривых многолетних колебаний р. Истры – п. Павловская слобода и р. Волги – в замыкающем створе г. Волгоград (рис. 6). Поскольку уравнение (2), как уже отмечалось выше, получено по данным метеорологических станций, расположенных на территории ЕТР, большую часть которой занимает бассейн р. Волги, оно наиболее полно отражает связь между входящими в него элементами водного баланса именно для этой природной зоны. Для лесостепной и особенно степной природных зон ошибки расчета довольно велики и достигают для последней 28%. Такие большие ошибки могут быть обусловлены малыми абсолютными величинами стока, характерными для данной природной зоны. С другой стороны, фазы понижения и повышения стока в степной зоне асинхронны их

**Таблица 9.** Фактический и “климатический” сток в природных зонах бассейна Волги в разные по водности фазы

Маловодная фаза (1935–1976), мм		
178,7	179,8	1%
Многоводная фаза (1977–2000), мм		
222.2	221.8	0%
Лесостепная зона		
Сток		Ошибка расчёта
Фактический	Климатический	
Маловодная фаза (1949–1976), (1982–1993) мм		
89	79	11%
86	72	16%
Многоводная фаза (1977–1981), (1994–2003) мм		
137	126	8%
121	129	6%
Степная зона		
Сток		Ошибка расчёта
Фактический	Климатический	
Маловодная фаза (1966–2002) мм		
24	23	5%
Многоводная фаза (1939–1965) мм		
35	45	28%

**Рис. 6.** Разностно-интегральные кривые речного стока р. Истры – п. Павловская слобода и р. Волги – г. Волгоград.

наступлению в лесной зоне (рис. 6) [34], что также может сказаться на точности расчета. В целом же представляется, что требуется уточнение параметров уравнения (2) по данным, полученным только для этих природных зон.

Сопоставление данных, приведенных в табл. 1 и 8, показывает, что для всего бассейна Волги относительное отклонение расчета по полному стоку для маловодного периода составляет 26%, а для многоводного – только 4%. Это свидетель-

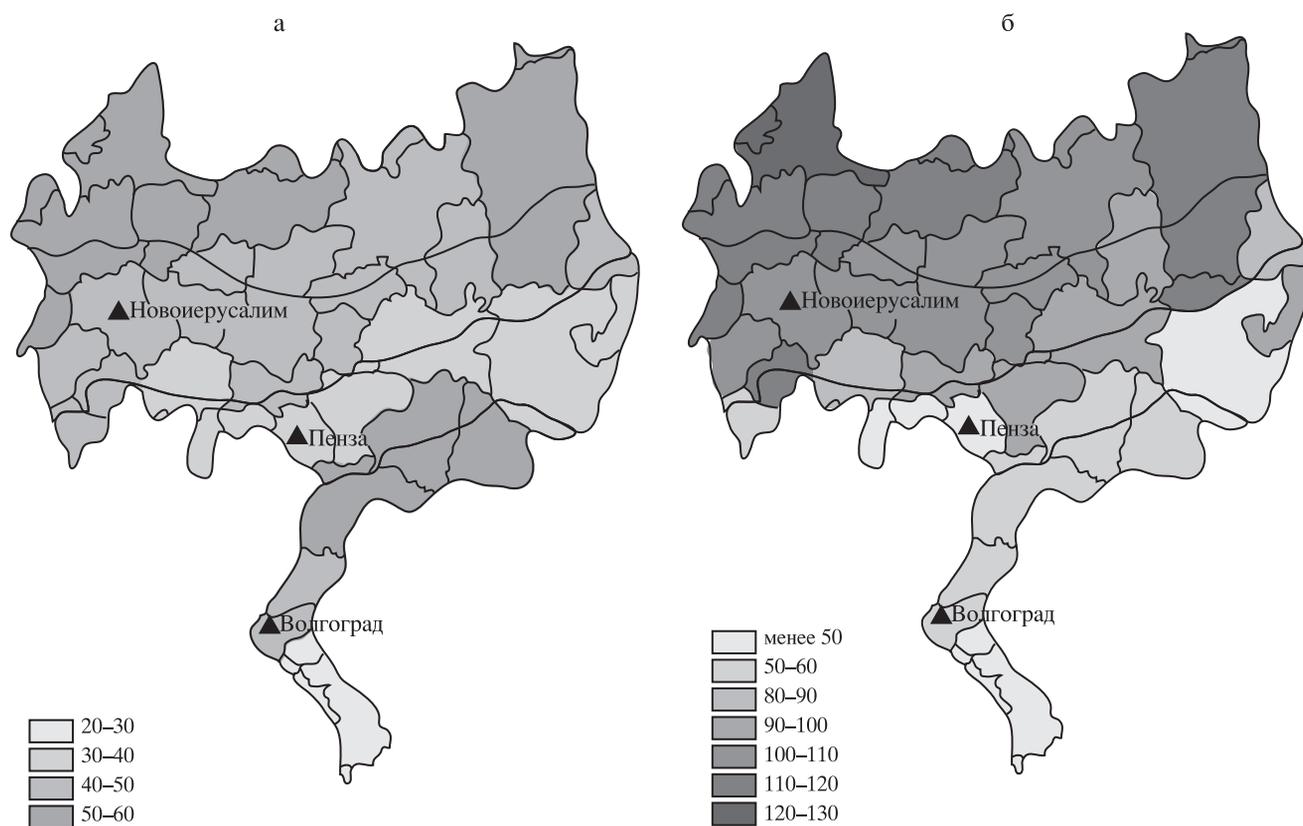


Рис. 7. Пространственное распределение осадков в бассейне р. Волги в разные по водности фазы: а – маловодная фаза; б – многоводная фаза.

стует о том, что разработанная методика позволила получить реалистичные оценки элементов водного баланса и его структурных показателей как для отдельных природных зон, так и всего бассейна Волги с достаточно высокой точностью для многоводных и в меньшей степени для маловодных фаз многолетнего периода.

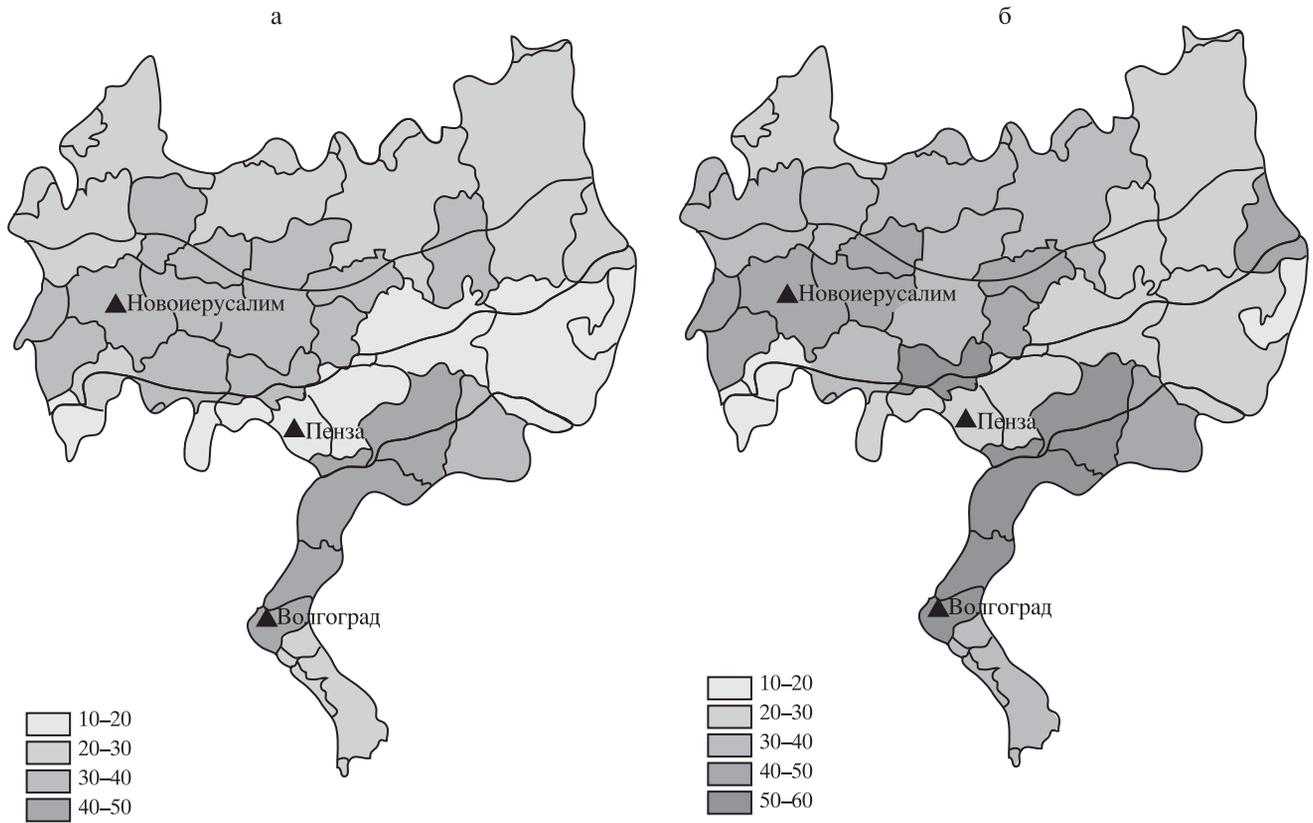
**Пространственная изменчивость элементов водного баланса в бассейне Волги в разные по водности фазы.** Для характеристики пространственной изменчивости элементов водного баланса в маловодные и многоводные фазы по данным, полученным для субъектов РФ, построены соответствующие карты (рис. 7–10). Эти карты отражают изменение по территории бассейна абсолютных отклонений их величин в эти фазы от средних значений за весь многолетний период.

Отклонение слоя осадков в маловодную и многоводную фазы от среднего многолетнего значения по площади бассейна Волги происходило неравномерно (рис. 7). Так, если в маловодные фазы слой осадков уменьшался максимально на 60 мм, то в многоводные – увеличение их слоя достигало 120–130 мм. В наибольшей степени эта неравномерность отразилась в маловодные фазы

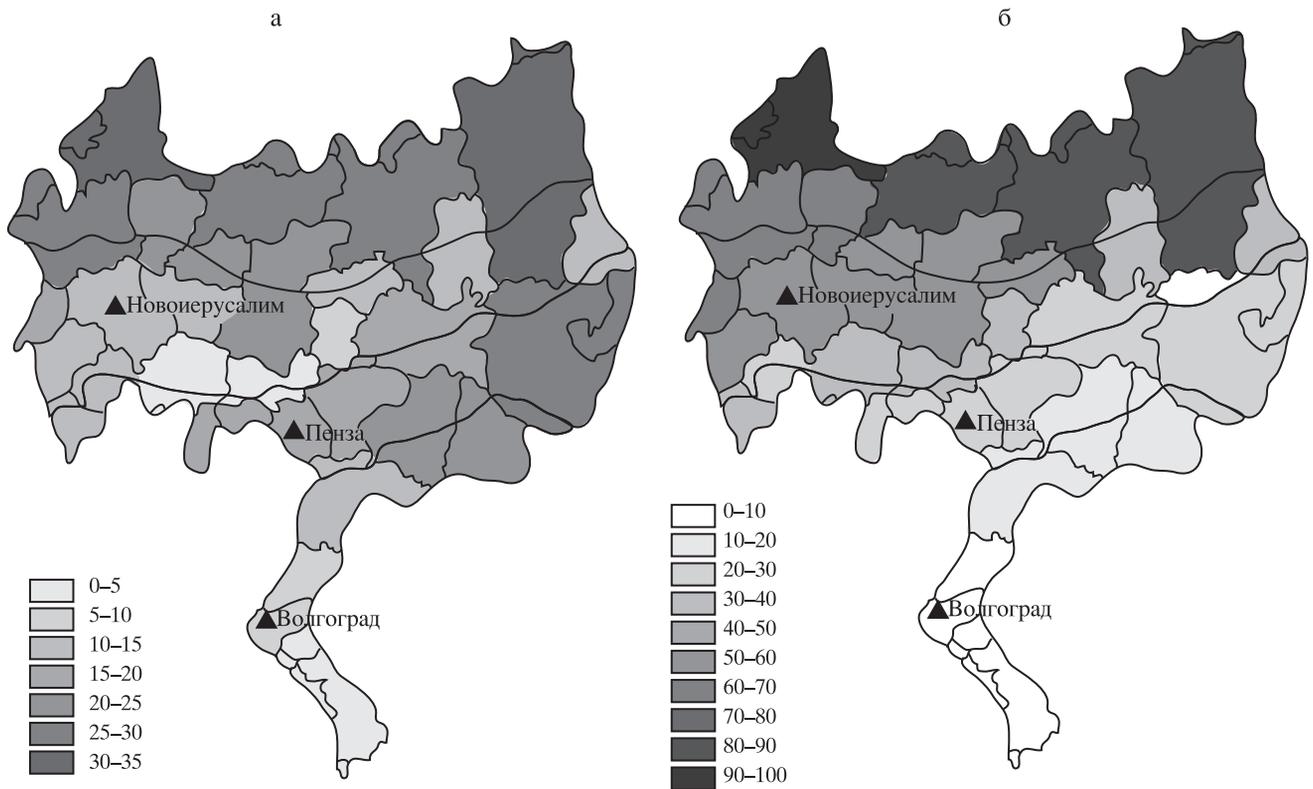
в северо-западной части бассейна (Вологодская, Тверская, Костромская и Ярославская области), а также на территории областей, расположенных в переходной от лесостепной к степной зонам – Саратовской, Оренбургской и Самарской.

Уменьшение и увеличение слоя испарения происходило в равной степени (рис. 8). Наиболее резко сказывались эти изменения в областях, расположенных в степной и на ее границе с лесостепной зоной. Уменьшение и увеличение испарения здесь достигает 50–60 мм, что достаточно весомо с учётом того, что в среднем слой испарения в этих областях около 400 мм.

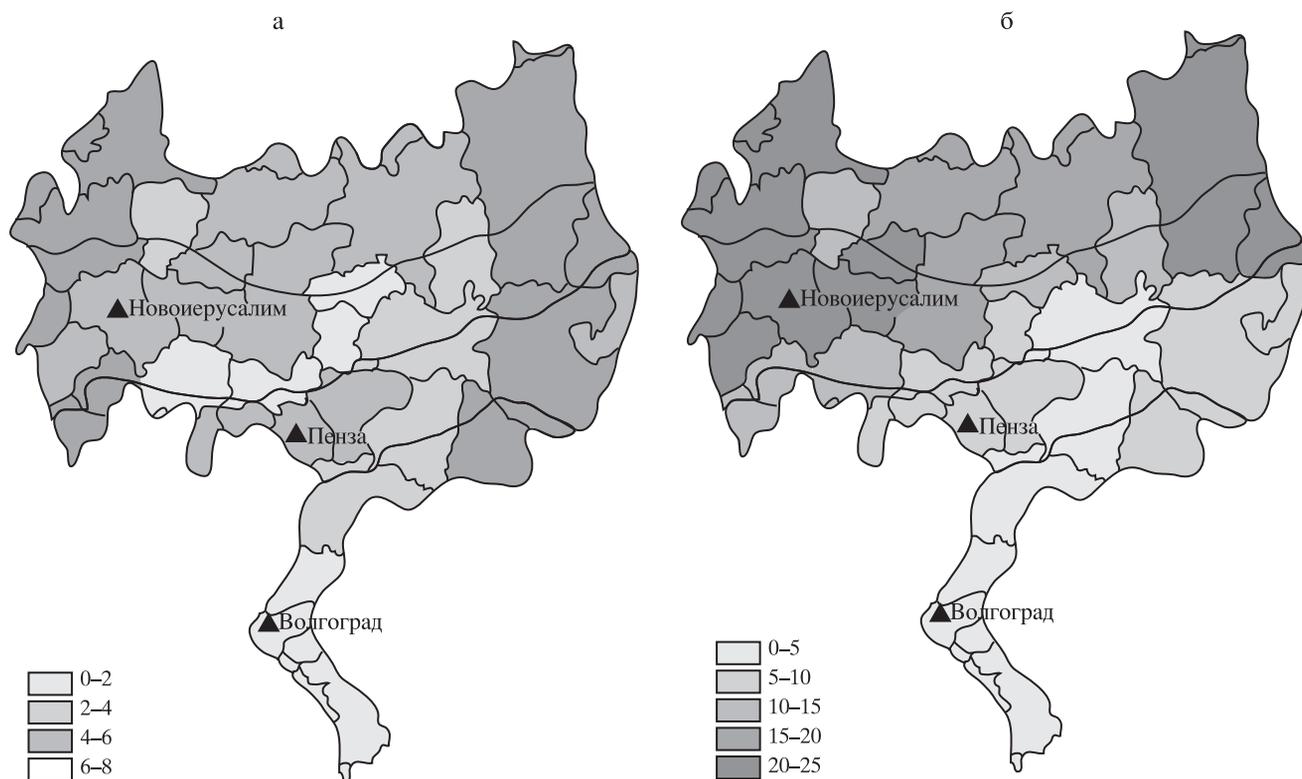
Результатирующей же двух предыдущих составляющих водного баланса является суммарный сток с территории бассейна (рис. 9). В маловодные годы уменьшение стока происходило неравномерно на всей территории Волжского бассейна. Это объясняется спецификой сочетания осадков и испарения в каждом конкретном субъекте РФ. Однако в целом сток в маловодные фазы уменьшался не сильно, в пределах 35 мм. Гораздо существенней сказывается увеличение стока в многоводные фазы, местами он возрастает на 90–100 мм (Вологодская обл.), что является следствием обильных



**Рис. 8.** Пространственное распределение испарения в бассейне р. Волги в разные по водности фазы: а – маловодная фаза; б – многоводная фаза.



**Рис. 9.** Пространственное распределение суммарного стока в бассейне р. Волги в разные по водности фазы: а – маловодная фаза; б – многоводная фаза.



**Рис. 10.** Пространственное распределение подземного стока в бассейне р. Волги в разные по водности фазы: а – маловодная фаза; б – многоводная фаза.

осадков, которые не компенсируются достаточным испарением с территории.

На изменение подземного стока во многом влияет геолого-геоморфологическое строение различных частей бассейна Волги. Это отразилось, прежде всего, в областях, расположенных в степной и лесостепной зонах. Изменения подземного стока в разные по водности фазы малы из-за глубокого залегания грунтовых вод и их слабой реакции на региональные изменения климата [34]. Высока доля подземного стока от суммарного в северо-западном районе бассейна с высокой инфильтрационной способностью почв (Тверская, Вологодская, Смоленская и др. области), что отразилось как на его существенном повышении в многоводную фазу (до 25 мм), так и на его понижении в маловодную фазу (до 8 мм) (рис. 10).

В целом изменения всех элементов водного баланса в разные по водности фазы имеют общую тенденцию к снижению от северо-западной к юго-восточной части бассейна Волги, что полностью отражает географические закономерности зонального распределения тепла и влаги на его территории.

#### Выводы

1. Для различных природных зон и всего бассейна р. Волги получены осредненные оценки

водного баланса и его структурных коэффициентов в длительные фазы их понижения и повышения в течение многолетнего периода. Эти оценки могут являться аналогами их изменений в будущем при возможных изменениях климата.

2. Во всех природных зонах и во всем бассейне Волги осадки в многоводную фазу превышают их величину в маловодную примерно в 1.2 раза, испарение и коэффициент увлажнения – также примерно в 1.2 раза. Суммарный речной сток в лесной и лесостепной зонах в многоводную фазу также повышается, но уже в 1.5 раза. В степной зоне многолетние колебания суммарного речного стока асинхронны его изменениям в лесной зоне. Его увеличение в многоводную фазу по сравнению с маловодной более существенны, чем в лесной и лесостепной зонах, что обусловлено физико – географическими особенностями ее территории.
3. Изменения водного баланса и его структурных коэффициентов в разные по водности фазы распространяются на весь обширный бассейн р. Волги. Однако в разных природных зонах эти изменения проявляются неодинаково, следуя общей тенденции к снижению от северо-западной к юго-восточной его части.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Акименко Т.А., Евстигнеев В.М.* Реакция стока рек Верхне-Волжского бассейна на изменение климата в последней четверти XX века // Вестн. МГУ. Сер. 5. геогр. 2002. № 5. С. 50–55.
2. *Бабкин В.И.* Многолетние колебания стока Волги, Оки, Дона, Днепра и методы его прогноза // Изв. РАН. Сер. геогр. 2008. № 3. С. 92–98.
3. *Борзенкова И.И., Лемешко Н.А.* Водный баланс бассейна Волги в начале XXI века (на основе палеоклиматических сценариев) // Метеорология и гидрология. 2005. № 7. С. 52–60.
4. *Будаговский А.И., Бусарова О.Е.* Основы метода оценки изменений ресурсов почвенных вод и речного стока по различным сценариям изменения климата // Водные ресурсы. 1991. № 2. С. 5–16.
5. *Бусарова О.Е., Гусев Е.М.* Использование результатов моделирования изменения климата для оценки изменения суммарного испарения на территории Европы // Метеорология и гидрология. 1995. № 10. С. 29–34.
6. *Бусарова О.Е., Гусев Е.М., Денисенко Е.А.* Реакция испарения и первичной биологической продуктивности на возможные изменения климата на Европейской территории // Изв. РАН. Сер. геогр. 1995. № 3 С. 52–58.
7. Водные ресурсы и водный баланс территории Советского Союза. Л.: Гидрометеиздат, 1967. 200 с.
8. Водные ресурсы России и их использование / Под ред. проф. И.А. Шикломанова. СПб. ГГИ. 2008. 600 с.
9. Водохранилища и их воздействие на окружающую среду / Под ред. Г.В. Воропаева, А.Б. Авакяна. М.: Наука, 1986. 365 с.
10. Возрождение Волги – шаг к спасению России. М. – Нижний Новгород: Экология, 1996. 464 с.
11. *Евстигнеев В.М.* Аналитическое описание климатических факторов изменчивости годового стока // Тр. Академии водохоз. наук. Вып. 5. Гидрология и русловые процессы. М.: 1998. С. 31–36.
12. *Евстигнеев В.М., Акименко Т.А., Евсеева Л.С.* Географические закономерности межгодовых колебаний речного стока // Проблемы гидрологии и гидроэкологии / Под ред. проф. Алексеевского Н.И. Вып. 1. М.: Геогр. ф-т МГУ. 1999. С. 95–118.
13. *Зайцева И.С.* Многолетние колебания стока Волги и глобальные изменения климата // Изв. РАН. Сер. геогр. 1996. № 5. С. 45–54.
14. *Зайцева И.С.* Маловодные годы в бассейне Волги: природные и антропогенные факторы. М.: ИГ АН СССР. 1990. 184 с.
15. *Исмаилов Г.Х., Голубаиш Т.Ю.* Оценка влияния возможных изменений климата на составляющие водного баланса бассейна р. Волги // Тр. Академии водохоз. наук. Вып. 5. Гидрология и русловые процессы. М.: 1998. С. 37–50.
16. *Исмаилов Г.Х., Федоров В.М.* Анализ многолетних колебаний годового стока Волги // Водные ресурсы. 2001. Т. 28. № 5. С. 517–525.
17. *Исмаилов Г.Х., Федоров В.М.* Гидрологические основы моделей управления водными ресурсами речного бассейна и их информационного обеспечения // Труды Академии водохоз. наук. Вып. 5. Гидрология и русловые процессы. М.: 1998. С. 59–70.
18. *Клиге Р.К., Ковалевский В.С., Федорченко Е.А.* Влияние глобальных климатических изменений на водные ресурсы Волжского бассейна // Глобальные изменения природной среды (климат и водный режим) М.: Научный мир, 2000. С. 220–236.
19. *Козловский Ф.И., Денисенко Е.А., Люри Д.И.* Влияние изменений климата на растительные и почвенные ресурсы России // Региональные аспекты развития России в условиях глобальных изменений природной среды и климата. М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2001. С. 36–54.
20. *Коронкевич Н.И.* Водный баланс Русской равнины и его антропогенные изменения. М.: Наука, 1990. 204 с.
21. *Круглова Г.В., Христофоров А.В., Эдельштейн К.К.* Влияние антропогенных факторов на многолетние колебания стока Волги // Вестник МГУ. Сер. 5. геогр. 1994. № 1. С. 48–55.
22. *Мещерская А.В., Александрова Н.А., Голод М.П.* Температурно-влажностный режим на водосборах Волги и Урала и оценка его влияния на изменения уровня Каспийского моря // Водные ресурсы. 1994. Т. 21. № 4. С. 463–470.
23. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Сер. 3. Многолетние данные. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 159 с.
24. *Панин Г.Н., Соломонова И.В., Выручалкина Т.Ю.* Климатические тенденции в средних и высоких широтах северного полушария // Водные ресурсы. 2009. Т. 36. № 6. С. 743–756.
25. *Переведенцев Ю.П.* Теория климата. Изд-во Казанского ун-та, 2004. 318 с.
26. *Раткович Д.Я.* Многолетние колебания речного стока. Закономерности и регулирование. Л.: Гидрометеиздат, 1976. 255 с.
27. *Розенберг Г.С.* Волжский бассейн на пути к устойчивому развитию. Тольятти: Изд-во Кассандра, 2009. 476 с.
28. Россия: речные бассейны. Екатеринбург. 1999. 520 с.
29. *Саруханян Э.И., Смирнов Н.П.* Многолетние колебания стока Волги. Л.: Гидрометеиздат, 1971, 166 с.
30. *Сидоренков Н.А., Орлов И.А.* Атмосферные циркуляционные эпохи и изменения климата // Метеорология и гидрология. 2008. № 9. С. 22–29.
31. *Сидорова М.В., Ермакова Г.С.* Прогнозирование величины речного стока на данных климатического

- моделирования // Прогноз климатической ресурсо-обеспеченности Восточно – европейской равнины в условиях потепления XXI века. М.: Макс Пресс, 2008. С. 183–197
32. Сотникова Л.Ф. Исследование характеристик стока при управлении водно – ресурсной системой р. Волги // Водные ресурсы Волги. Настоящее и будущее, проблемы управления. Астрахань, 2008. С. 307–315.
33. Шерстюков Б.Г., Салугаивили Р.С. Новые тенденции в изменениях климата Северного полушария Земли в последнее десятилетие // Тр. ГУ ВНИИГМИ – МЦД. Вып. 175. 2010. С. 43–51.
34. Ясинский С.В., Какутина Е.А. Влияние региональных колебаний климата и хозяйственной деятельности на изменение гидрологического режима водосборов и стока малых рек // Водные ресурсы. 2012. Т. 39. № 3. С. 269–291.

## **Water balance of natural zones in Volga river basin during high-water and low-water phases of the multi-year fluctuation**

**S.V. Yasinski**

*Institute of Geography, Russian Academy of Sciences*

A method of calculation of the water balance components and its structural indices on the territory of the natural zones and the whole Volga river basin during low- and high-water phases of the multi-year fluctuation is worked out. The maps are presented to show the allocation of the water balance components during these phases as well as deviations from multi-year average for the subjects of the Russian Federation located on the territory of the Volga river basin. Evaluation of the calculation method accuracy is conducted. The greatest calculation accuracy is observed for water-balance components for the forest natural zone and less accuracy is proved for the forest-steppe zone. Calculations for the steppe zone require refinement of the parameters to calculate evaporation from large areas over a sufficiently long period.