

УДК 502/504:556.16

Г. Х. ИСМАЙЛОВ, Н. В. МУРАЩЕНКОВА

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный университет природообустройства»

## МЕЖГОДОВАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ЭЛЕМЕНТОВ ВОДНОГО БАЛАНСА БАСЕЙНА РЕКИ ДОН

*Представлены результаты исследования по определению суммарного испарения и изменения бассейновых влагозапасов бассейна реки Дон за 1952/53–2006/07 годы. Использовались данные об атмосферных осадках и речном стоке.*

*Элементы водного баланса, речной сток, бассейновые влагозапасы, суммарное испарение, коэффициент корреляции.*

*There are given research results on defining an evapotranspiration and change of basin water supplies of the Don river for a period of 1952/53–2006/07 using the data on precipitation and river flow.*

*Elements of water balance, river flow, basin water supplies, evapotranspiration, correlation coefficient.*

Наблюдающиеся в настоящее время климатические изменения, выраженные в повышении средней глобальной температуры воздуха и изменении режима атмосферных осадков, могут привести к изменениям составляющих водного баланса – речного стока и испарения с поверхности речного бассейна. В связи с этим возникает необходимость оценки пространственно-временных изменений элементов водного баланса крупных речных бассейнов в условиях климатических изменений.

На основе методики, представленной в работах [1, 2], были проведены исследования по определению суммарного испарения и изменения бассейновых влагозапасов с бассейна реки Дон за период с 1952/53 по 2006/07 год. Используя многолетние данные годовых сумм атмосферных осадков и речного стока, авторы определили суммарное испарение с поверхности речного бассейна и изменение бассейновых влагозапасов за многолетний период.

В основе данной методики лежит четырехчленное уравнение водного баланса

(ВБ) речного бассейна, включающего атмосферные осадки  $P$ , речной сток  $R$ , суммарное испарение  $E$  и изменение бассейновых влагозапасов  $\pm \Delta V$ .

Уравнение водного баланса речного бассейна:

$$\begin{aligned} P_i + \Delta V_i &= R_i + E_i; \\ E_i &= 0; R_i &= 0; \\ P_i + \Delta V_i &= R_i; & P_i + \Delta V_i &= E_i; \\ \Delta V_{iR} &= R_i - P_i; & \Delta V_{iE} &= E_i - P_i; \\ E_i \neq 0, R_i &\neq 0; & P_i + \Delta V_i &= R_i + E_i; \\ \Delta V_i &= \Delta V_{iR} + \Delta V_{iE}; \\ \Delta V_{iR} &= R_i - 0,5P_i; & \Delta V_{iE} &= E_i - 0,5P_i. \end{aligned}$$

Используя временные ряды годовых суммарных атмосферных осадков  $P_i$  и годового стока  $R_i$ , определяем их статистические параметры (математическое ожидание, среднеквадратические отклонения и коэффициенты автокорреляции и кросс-корреляции):  $P_i, R_i, i=1, N \Rightarrow \bar{P}, \bar{R}, \Delta \bar{V}_R, \sigma_P, \sigma_R, \sigma_{\Delta V_E}, r(\tau), r(\Delta V_{iR} P)$ ;

$$\begin{aligned} \Delta \bar{V} &= 0, \Delta \bar{V}_R = \pm A; \\ \tilde{\sigma}_{\Delta V_E} &= f(\sigma_{\Delta V_R}), r(\Delta \tilde{V}_E \Delta V_R) = f(\bar{k}_R); \\ r(\Delta V_E P) &= f(\bar{k}_R), \bar{k}_R = \bar{R} / \bar{P}. \end{aligned}$$

Затем вычисляем среднеголетний коэффициент годового стока  $k_{R_{cp}}$ , учитывая, какая часть атмосферных осадков участвует в формировании речного стока:

$$k_{R_{cp}} = \frac{R_{cp}}{P_{cp}} = 1 - \frac{E_{cp}}{P_{cp}}. \quad (1)$$

Как видно из уравнения (1), при стремлении годового суммарного испарения к нулю коэффициент годового стока  $k_{R_{cp}}$  стремится к единице, а при стремлении годового суммарного испарения к годовой сумме осадков коэффициент годового стока  $k_{R_{cp}}$  стремится к нулю. Если принять гипотезу, что существует «глобальное» состояние равновесия гидрологической системы бассейна, при котором осадки участвуют в равной степени в формировании стока и испарения, то будут справедливы следующие условия:

$$\left. \begin{aligned} R_i &= E_i; \\ k_{iR} &= k_{iE} = 0,50. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Тогда

$$\left. \begin{aligned} [R_i] &= [E_i] = 0,50P_i; \\ [\Delta V_i] &= [\Delta V_{iR}] + [\Delta V_{iE}]. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Далее определяем изменение бассейновых влагозапасов, участвующих в формировании стока  $i$ -го года («влагозапасы по стоку»), где знак «+» соответствует сработке бассейновых влагозапасов, а «-» — их накоплению:

$$\pm [\Delta V_{iR}] = \pm (R_i - [R_i]). \quad (4)$$

Затем вычисляем отклонения изменения влагозапасов по стоку от их среднеголетних значений ( $\Delta[\Delta V_{iR}]$ ) и отклонения годовых суммарных осадков от их нормы  $\Delta P_i$ :

$$\begin{aligned} \Delta [\Delta V_{iR}] &= [\Delta V_{iR}] - [\Delta V_{iR}]_{cp}; \\ \Delta P_i &= P_i - P_{cp}. \end{aligned}$$

Согласно данному условию, вычисляем коэффициент корреляции изменения влагозапасов по стоку с осадками  $\pm r(\Delta V_{iR}, P)$ .

Для оценки  $[\Delta V_{iE}]$  можно предложить зависимость следующего вида:

$$[\Delta V_{iE}] = f(P_i, R_i, [\Delta V_{iR}]).$$

Получив ежегодные значения  $[\Delta V_{iR}]$ ,  $[\Delta V_{iE}]$  и  $P_i$ , определяем коэффициенты корреляции изменения влагозапасов по испарению с осадками, стоком и изменением влагозапасов по стоку  $r([\Delta V_{iE}], P)$ ,  $r([\Delta V_{iE}], R)$ ,  $r([\Delta V_{iE}], [\Delta V_{iR}])$ , а также их среднеквадратические отклонения  $\sigma([\Delta V_{iE}]$ ,

$\sigma([\Delta V_{iR}])$ ,  $\sigma(R)$  и  $\sigma(P)$ .

По этим данным получаем многофакторные уравнения регрессии, например:

$$[\Delta V_{iE}] = a \Delta [\Delta V_{iR}] + b \Delta P_i + [\Delta V_{iE}]_{cp}, \quad (5)$$

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

Зависимость (5) затем используется для определения ежегодного испарения:

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

Для  $[E_i]$  определяем основные статистические параметры (среднее значение, стандарт, коэффициент вариации, коэффициент автокорреляции).

По определенным величинам  $[\Delta V_{iR}]$  и  $[\Delta V_{iE}]$  вычисляем изменение бассейновых влагозапасов  $[\Delta V_i]$ :

$$[\Delta V_i] = [\Delta V_{iR}] + [\Delta V_{iE}] = R_i + [E_i] - P_i.$$

Данная методика была реализована для определения суммарного испарения и изменения бассейновых влагозапасов для речного бассейна Дона. Водосборный бассейн Дона занимает центральную часть юга Европейской России и включает наиболее развитые в индустриальном и сельскохозяйственном отношении отрасли, насыщен транспортными связями и имеет выход к Азовскому морю.

По характеру водного режима Дон и его притоки относятся к рекам равнинного типа с резко выраженным весенним половодьем и низкой маловодной меженью. Основным источником питания являются талые воды. Основной объем водных ресурсов (71%) формируется на Верхнем и Среднем Дону (от истока до города Калач-на-Дону) на площади водосбора 222 тыс. км<sup>2</sup>. На водность Дона у города Калач-на-Дону большое влияние оказывают его восточные притоки — Хопер, Медведица и Иловля, которые протекают по засушливой территории. Поэтому в качестве объекта исследования выбран бассейн Верхнего Дона (до станицы Казанская), замыкающий менее засушливую верхнюю часть бассейна площадью 102 тыс. км<sup>2</sup>.

Для определения годового суммарного испарения и изменения бассейновых влагозапасов Верхнего Дона в соответствии с указанной методикой расчета используем многолетние данные годовых суммарных осадков и годового стока реки Дон. При определении средних по бассейну сумм осадков были использованы данные по 7 метеорологическим станциям, относительно равномерно расположенным

в бассейне Верхнего Дона, за 1951–2006 годы. Поскольку Дон относится к типу рек, в режиме которых определяющая фаза – весеннее половодье, годовые значения осадков определены с 01 ноября предыдущего года по 31 октября текущего года. Среднегодовое значение годовых осадков составило 534 мм/год при крайних значениях 719 мм/год (1981/82 год) и 373 мм/год (1983/84 год). Среднеквадратическое отклонение – 76 мм/год, коэффициент вариации – 0,14, коэффициент корреляции смежных лет – 0,09.

Годовой сток реки Дон у станции Казанская определен с начала весеннего половодья текущего года (1 апреля) до окончания зимней межени следующего года (31 марта) в период с 1952/53 по 2006/07 год ( $n = 55$  лет). Среднегодовой сток реки Дон составил 96 мм/год при крайних значениях 166 мм/год (1963/64 год) и 51 мм/год (1972/73 год). Среднеквадратическое отклонение – 26 мм/год, коэффициент вариации – 0,28, коэффициент корреляции смежных лет – 0,16.

Располагая временными рядами годовых сумм атмосферных осадков в бассейне Верхнего Дона и годового стока реки Дон в створе станции Казанская, согласно приведенной методике расчета, осуществляем оценку годового суммарного испарения и изменения бассейновых влагозапасов.

Сначала определяем ежегодные значения стока, соответствующие «глобальному» равновесию гидрологической системы бассейна, согласно уравнениям (2), (3), и изменения бассейновых влагозапасов по стоку, используя уравнение (4).

Находим среднеквадратическое отклонение изменения бассейновых влагозапасов по стоку  $\sigma_{\Delta VR}$  и коэффициент корреляции их с осадками  $r_{(\Delta VR),P}$ . По известному значению среднегодового стока и по эмпирическим зависимостям определяем коэффициент корреляции между изменением бассейновых влагозапасов по испарению и изменением бассейновых влагозапасов по стоку  $r_{(\Delta VE),(\Delta VR)}$  и коэффициент корреляции между изменением бассейновых влагозапасов по испарению и атмосферными осадками  $r_{(\Delta VR),P}$ . Среднеквадратическое отклонение влагозапасов по испарению принимаем равным таковому по стоку. Для годового стока реки Дон при среднегодовом коэффициенте годового стока  $k_{cp} = 0,18$ ,  $\sigma_p = 76$  мм/год,  $\sigma_{\Delta VR} = 43$  мм/год и  $r_{(\Delta VR),P} = -0,79$  находим:  $\sigma_{\Delta VE} = 52$  мм/год;  $r_{(\Delta VE),(\Delta VR)} = -0,53$ ;  $r_{(\Delta VE),P} = -0,30$ . Тогда уравнение для нахождения изменения влагозапасов по испарению принимает следующий вид:

$$[\Delta V_{iE}] = -1,925\Delta V_{iR} - 1,01\Delta P_i + 171 \text{ мм/год.}$$

Собственно испарение  $[E_i] = 0,5 P_i + [\Delta V_{iE}]$  мм/год, а общее изменение бассейновых влагозапасов равно сумме его составляющих:

$$[\Delta V_i] = \Delta V_{iR} + [\Delta V_{iE}] \text{ мм/год.}$$

В результате реализации предлагаемой методики оценки годового испарения по речному стоку и атмосферным осадкам получены многолетние ряды основных элементов водного баланса бассейна реки Дон за 1952/53–2006/07 годы ( $n = 55$  лет). Статистические параметры элементов водного баланса бассейна реки Дон приведены в табл. 1, коэффициенты

Таблица 1

Статистические параметры элементов водного баланса (ЭВБ) бассейна реки Дон у станции Казанская за 1952/53–2006/07 годы ( $n = 55$  лет), мм/год

Статистические параметры ЭВБ	Годовые суммы атмосферных осадков $P$ , мм	Годовой сток $R$ , мм	Годовое суммарное испарение $E$ , мм	Бассейновые влагозапасы $\pm[\Delta V_i]$ , мм
Среднее значение	534	96	438	0
Среднеквадратическое отклонение $\sigma$	76	26	57	51
Коэффициент вариации $C_v$	0,14	0,28	0,13	–
Амплитуда	346	115	310	228
Коэффициент автокорреляции $r(1)$	0,09	0,16	0,17	0,09

их взаимной корреляции в табл. 2. Анализ коэффициентов взаимной корреляции элементов водного баланса показал, что высокую статистическую зависимость имеет годовой сток с эффективными осадками ( $P - E$ ), для которых коэффициент корреляции равен 0,81. Статистически значимым является также коэффициент корреляции стока с годовым суммарным испарением, который равен  $-0,80$ . Тесную корреляционную зависимость имеют годовые суммы осадков с изменением бассейновых влагозапасов ( $R = -0,88$ ).

Таблица 2

**Коэффициенты взаимной корреляции элементов водного баланса (ЭВБ) бассейна реки Дон за 1952/53–2006/07 годы**

ЭВБ	$P$	$R$	$E$	$\pm[\Delta V_i]$	$P - E$
$P$	1	0,15	0,47	$-0,88$	0,70
$R$		1	$-0,8$	$-0,60$	0,81
$E$			1	0,0	$-0,30$
$\pm[\Delta V_i]$				1,0	$-0,95$
$P - E$					1,0

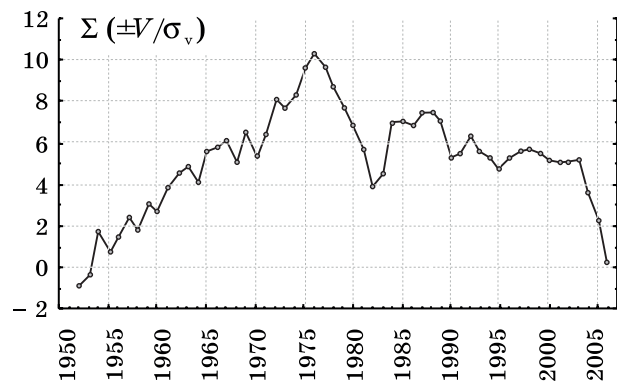
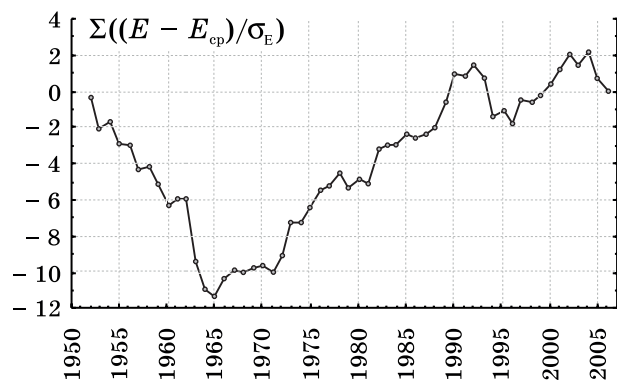
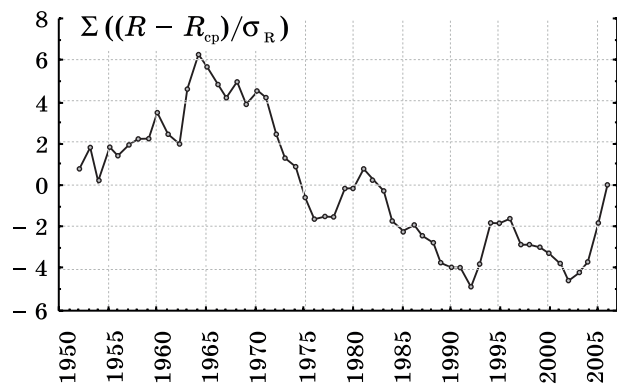
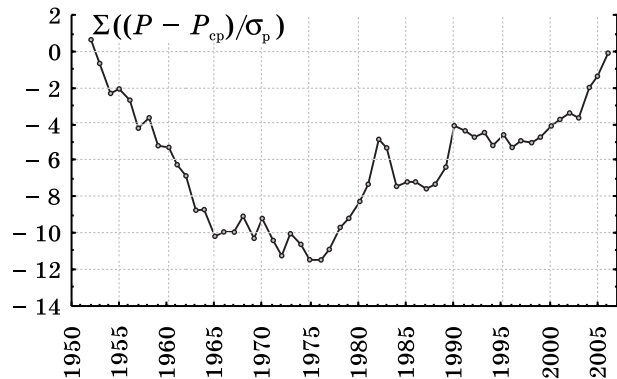
Нормированные разностные интегральные кривые элементов водного баланса бассейна реки Дон представлены на рисунке. Анализ данных кривых показал, что фаза повышенной водности (с начала периода до 1965/66 года) соответствует уменьшению осадков в этот период, следовательно, можно предположить, что увеличение стока реки Дон происходит за счет сработки бассейновых влагозапасов. Период устойчивого маловодья с 1966/67 по 1976/77 год обусловлен снижением естественной увлажненности бассейна. Но на фоне снижения осадков в этот период отмечается рост суммарного испарения. Кроме того, в эти годы происходит сработка бассейновых влагозапасов, следовательно, можно предположить, что влагозапасы участвуют в формировании испарения с поверхности речного бассейна. С 1977/78 по 1981/82 год сток повышается за счет резкого увеличения осадков, причем в этот период происходит наполнение бассейновых влагозапасов.

Поскольку происходящее в настоящее время изменение климата связано с повышением температуры воздуха, в дополнение к временным рядам элементов водного баланса рассмотрен временной ряд среднегодовой температуры воздуха

за исследуемый период. Для этого ряда характерен статистически значимый положительный тренд:

$$T = 0,029 \cdot t - 50,$$

что свидетельствует о постепенном росте температуры в течение рассматриваемого периода. Величина тренда составляет  $+0,29$  °C/10 лет.



**Разностные интегральные кривые элементов водного баланса бассейна реки Дон за 1952/53–2006/07 годы**

**Выводы**

Изменение годовых сумм осадков и суммарного испарения с поверхности речного бассейна за исследуемый ретроспективный период (1952/53–2006/07 годы) имеет тенденцию к увеличению. Величины трендов составляют 19 мм/10 лет и 8 мм/10 лет.

Период с 1952 по 1975 год соответствует снижению естественной увлажненности бассейна Верхнего Дона, тогда как с 1976 по 2006 год наблюдается общая тенденция к увеличению годовых сумм атмосферных осадков. Речной сток за период с 1952 по 1965 год представляет собой фазу повышенной водности, а затем наступает период устойчивого маловодья (до 2002 года). Начиная с 2003 года речной сток имеет тенденцию к росту. Суммарное испарение повторяет тенденцию, свойственную колебаниям суммарных атмосферных осадков. Повышение речного стока подтверждается изменением бассейновых влагозапасов в сторону их сработки, хотя начиная с 1975 года наблюдается

наполнение бассейновых влагозапасов.

1. **Исмайылов Г. Х., Федоров В. М.** Межгодовая изменчивость и взаимосвязь элементов водного баланса бассейна реки Волги // Водные ресурсы. – 2008. – Т. 35. – № 3. – С. 259–276.

2. **Исмайылов Г. Х., Федоров В. М.** Оценка возможных изменений элементов годового водного баланса бассейна Волги // Природообустройство. – 2010. – № 5. – С. 58–64.

Материал поступил в редакцию 17.04.11.

**Исмайылов Габил Худуш оглы**, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Гидрология, метеорология и регулирование стока»

Тел. 8 (499) 976-23-68

E-mail: [Ism37@mail.ru](mailto:Ism37@mail.ru)

**Муращенкова Наталья Владимировна**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Гидрология, метеорология и регулирование стока»

Тел. 8 (499) 976-23-68

УДК 502/504:628.16

**Л. С. АЛЕКСЕЕВ, Е. В. ГЛАДКОВА**

Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Российский государственный аграрный заочный университет»

**ОЧИСТКА ПИТЬЕВОЙ ВОДЫ ОТ СТАБИЛЬНОГО СТРОНЦИЯ**

*Оценен способ очистки воды от стабильного стронция, основанный на электрохимическом воздействии на воду и осаждении стронция в виде карбоната. В диапазоне предварительно исследованных значений концентраций стронция (до 50 мг/л) этот способ позволяет снизить его содержание до 2...5 мг/л при предельно допустимом значении 7 мг/л.*

*Подземные воды, очистка воды от стронция, электрохимия.*

*The method of water cleaning from stable strontium was assessed by the authors which was based on the electrochemical action on water and strontium sedimentation in a form of carbonate. In the range of the preliminarily studied values of strontium concentrations (up to 50 mg/l) this method allows to decrease its content up to 2...5 mg/l under the maximum permissible level 7 mg/l.*

*Underground water, water cleaning of strontium, electrochemistry.*