

уровнем 55,39 и 54,14 м соответственно. Если в первой части графика колебания уровня почти повторяются, то во второй части (начиная с 1996 года) за счет подземной составляющей график сглаживается. Это означает, что в маловодные годы роль подземного стока более значима, чем в многоводные.

Выводы

Основным источником питания озера Эбейты является сток, формирующий-ся на поверхности водосбора.

Водоёмы, созданные на водосборе, отсекают часть водосборной площади, уменьшая приток воды в озеро, влияние водоёмов особенно значимо в маловодные годы.

Подземный сток играет огромную роль в формировании ресурсов озера, подпитывая ее в течение всего года, в маловодные годы значение подземного стока увеличивается.

Снижение уровня озера является результатом маловодных лет.

1. Карнацевич И. В, Тусупбеков Ж. А. Теплоэнергетические и водные ресурсы водосборов на территории Сибири: учеб.

пособие. – Омск: ОмГАУ, 2004. – 60 с.

2. Петрова О. М. Справочник по гидро-геологическим условиям сельскохозяйственного водоснабжения Исилькульского района Омской области. – Омск: ОмГРЭ, 1983. – 67 с.

3. Указания по расчету испарения с поверхности водоемов / Под ред. Т. С. Шмидт. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1969. – 83 с.

Материал поступил в редакцию 09.04.14.

Тусупбеков Жанболат Ашикович, кандидат географических наук, доцент, заведующий кафедрой «Комплексное использование и охрана водных ресурсов»

Тел. 8 (3812) 65-22-77, 8-913-965-19-79

E-mail: gggkiour@mail.ru

Ряполова Наталья Леонидовна, старший преподаватель кафедры «Комплексное использование и охрана водных ресурсов»

Тел. 8 (3812) 65-22-77,

E-mail: gggkiour@mail.ru

Надточий Виктория Сергеевна, старший преподаватель кафедры «Комплексное использование и охрана водных ресурсов»

Тел. 8 (3812) 65-22-77

E-mail: gggkiour@mail.ru

УДК 502/504:556.1

Г. Х. ИСМАЙЛОВ, КУН СЯНЦЗЮАНЬ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева»
Институт природообустройства имени А. Н. Костякова

АНАЛИЗ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ ВОДНОГО БАЛАНСА БАССЕЙНА РЕКИ ХУАНХЭ (КНР)*

Рассматриваются вопросы пространственной изменчивости элементов водного баланса бассейна реки Хуанхэ. Дается оценка их статистических параметров и степени взаимосвязи с целью анализа. Определена межгодовая изменчивость атмосферных осадков, испарения, годового стока и бассейновых влагозапасов реки Хуанхэ.

Атмосферные осадки, годовой сток, суммарное испарение, изменение влагозапасов, статистические параметры, расчет ЭВБ.

We consider the spatial changeability of water balance components of the Yellow river basin. There is given an assessment of their statistical parameters and degree of interrelationship with the purpose of analyzing. There is determined a changeability of precipitation, evaporation, annual runoff and basin water supplies of the Yellow river within a year.

Precipitation, annual flow, evapotranspiration, change of water content, statistical parameters, calculation EVB.

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 12-05-00193а).

В работе приведен анализ и дана оценка элементов водного баланса реки Хуанхэ. Хуанхэ – вторая по многоводности река в Китае. Ее длина 5464 км, площадь 752 тыс. км². Бассейн Хуанхэ по увлажненности относится к недостаточно увлажненным и засушливым районам страны, среднегодовые атмосферные осадки составляют около 480 мм, естественный объем речного стока – 5800 млн м³. Этого бассейна недостаточно для обеспечения требований отраслей народного хозяйства. Возникают и экологические проблемы [1].

Для анализа пространственной изменчивости элементов водного баланса (ЭВБ) бассейна реки Хуанхэ использованы временные ряды ЭВБ. Длительный ряд наблюдений за составляющими водного баланса (ВБ) для большей части территории Китая, в том числе и для бассейна реки Хуанхэ, позволяет с достаточной степенью надежности определить ЭВБ за многолетний период [2].

Пространственную изменчивость ЭВБ можно рассматривать в разных аспектах: как изменчивость отдельных характеристик ЭВБ (их статистических параметров – годовых, сезонных и месячных) по территории бассейна; изменчивость тех же характеристик в зависимости от локальных особенностей климата, от отдельных элементов ландшафта, от степени антропогенных нагрузок в различных частях бассейна. Количественные характеристики изменчивости ЭВБ за многолетний период рассмотрены в двух аспектах: интегральном, отражающем суммарную изменчивость временных рядов ЭВБ, и динамическом, отражающем колебания ЭВБ за конкретный отрезок времени.

При характеристике естественной увлажненности бассейна (по осадкам) представляется целесообразным не оставлять без внимания и осадки в диапазоне обеспеченности от 50 до 75 %. Как известно, среднемноголетняя величина (норма) определяется с погрешностью σ_p , зависящей от стандарта (σ) и числа лет наблюдений. В качестве приближенной оценки наибольшей ошибки определения среднего значения (нормы) можно принять $2\sigma_p$. Тогда среднемноголетние осадки за период наблюдений будут равны $P_{cp} \pm 2\sigma_p$. Следовательно, к числу маловодных будут относиться годы, величина осадков которых менее $P_{cp} - 2\sigma_p$. Для верхнего течения бассейна Хуанхэ при $\sigma = 77$ мм/год и $n = 50$ лет погрешность определения нормы годовых осадков равна 14 мм/

год, т. е. $2\sigma_p = \pm 28$ мм/год. Итак, к маловодным по условиям естественной увлажненности будем относить годы с величиной осадков $P_{cp} - 2\sigma_p = 320 - 28 = 292$ мм. По эмпирической кривой обеспеченности аномалий годовых осадков им соответствует диапазон обеспеченности от 60 до 99 %. Для среднего течения бассейна реки Хуанхэ при $\sigma = 124$ мм/год и $n = 50$ лет погрешность определения нормы годовых осадков равна 14 мм/год, т. е. $2\sigma_p = \pm 28$ мм/год. Итак, к маловодным по условиям естественной увлажненности будем относить годы с величиной осадков $P_{cp} - 2\sigma_p = 565 - 28 = 537$ мм. По эмпирической кривой обеспеченности аномалий годовых осадков им соответствует диапазон обеспеченности от 48 до 99 %.

На рисунке 1 приведена динамика аномалий годовых атмосферных осадков в бассейне реки Хуанхэ за период 1951/1952 – 1999/2000 годов и эмпирическая кривая их обеспеченности.

Как видно из рисунка 1, за 50 лет маловодными в бассейне верхнего течения реки Хуанхэ по осадкам являются 20 лет (40 %), из которых экстремальными (катастрофическими) по условиям увлажненности ($P \geq 90$ %) являются 5 лет (1972/1973, 1982/1983, 1969/1970, 1981/1982, 1980/1981) (рис. 1в, г). Для этих лет аномалия годовых осадков изменяется от 190 до 235 мм/год ($K = 0,59...0,73$); в бассейне среднего течения реки Хуанхэ за 50 лет маловодными по осадкам являются 26 лет (52 %), из которых экстремальными (катастрофическими) по условиям увлажненности ($P \geq 90$ %) являются 5 лет (1995/1996, 1955/1956, 1965/1966, 1997/1998, 1969/1970).

Помимо отдельных лет, маловодных по осадкам, выделяются и их группы, охватывающие от двух до 10 лет (рис. 1а, б). Так, в бассейне верхнего течения реки Хуанхэ можно выделить следующие группы лет:

двухлетки – 1956/1957–1957/1958,
1965/1966–1966/1967, 1974/1975–
1975/1976;

четырёхлетки – 1960/1961–
1963/1964, 1969/1970–1972/1973;

пятiletки – 1987/1988–1991/1992.

В бассейне среднего течения реки Хуанхэ можно выделить следующие группы лет:

двухлетки – 1959/1960–1960/1961,
1962/1963–1963/1964;

трехлетки – 1953/1954–1955/1956,
1995/1996–1997/1998;

пятiletки – 1965/1966–1969/1970,
1976/1977–1980/1981.

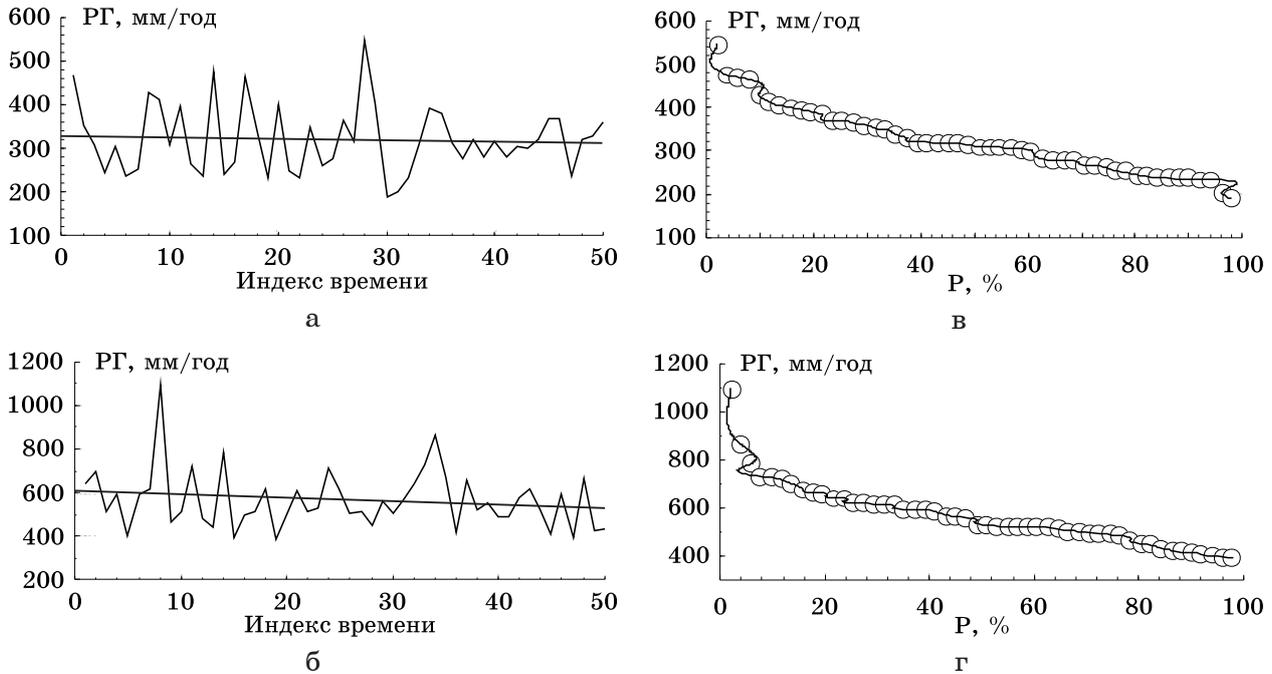


Рис. 1. График аномалий среднегодовых осадков реки Хуанхэ (а – верхнее течение, б – среднее течение) и эмпирические кривые обеспеченности (в – верхнее течение, г – среднее течение)

Для анализа изменчивости ЭВБ получены динамические ряды (временные ряды) за период с 1951/1952 по 1999/2000 годы ($n = 49$ лет). Анализ временных рядов ЭВБ позволил разделить всю территорию бассейна реки Хуанхэ на три участка по условиям стационарности основных статистических параметров элементов водного баланса, а также их внутрирядной и межрядной связи. Следовательно, по измен-

чивости структуры и динамике элементов водного баланса территория бассейна реки Хуанхэ разделена на три водохозяйственных района (ВХР): верхнее течение реки Хуанхэ (створ Ланчжоу), среднее течение реки Хуанхэ (створ Саньмэнься) и нижнее течение реки Хуанхэ (створ Хуаюанькоу). Для временных рядов выделенных ВХР определены выборочные оценки основных статистических параметров (табл.1).

Таблица 1
Выборочные оценки основных статистических параметров временных рядов годовых величин ЭВБ в бассейне Верхней Хуанхэ за 1951/1952–1999/2000 годы ($n = 49$ лет), мм

Статистический параметр	Год (VII – VI)					
	РГ	РГ	ЕГ	$\pm VG$	P-E	P-R
Бассейн верхнего течения реки Хуанхэ						
Среднее значение	320	149	170	0	150	170
Коэффициент вариации C_v	0,24	0,22	0,48	–	0,73	0,44
$r[1]$	-0,07	0,16	0,24	-0,07	-0,02	0,08
Бассейн среднего течения реки Хуанхэ						
Среднее значение	564	71	493	0	71	493
Коэффициент вариации C_v	0,22	0,22	0,23	–	1,63	0,24
$r[1]$	0,02	0,16	0,06	0,15	0,15	0,01

Примечание: РГ – атмосферные осадки; РГ – речной сток; ЕГ – суммарное испарение; VG – бассейновый влагозапас.

Для оценки достоверности наличия линейного тренда в динамике среднегодового ЭВБ в бассейне реки Хуанхэ были использованы временные ряды ЭВБ за 1951/1952–1999/2000 годы ($n = 49$ лет).

Для проверки наличия линейного

тренда использованы различные критерии, применяемые в гидрологии и метеорологии. По методике авторов, для проверки статистической значимости тренда рассчитывается уравнение линейной регрессии следующего вида [3]:

$$Y(t) = a_0 + a_1 t. (1)$$

Для оценки достоверности наличия линейного тренда в уравнении (1) использованы следующие критерии:

коэффициент корреляции временного ряда со временем –

$$R_{xi} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(i - \bar{i})}{[(n-1)\sigma_x \sigma_i]}; \quad (2)$$

ранговый критерий Спирмена –

$$\rho = 1 - 6 \sum_{i=1}^n \frac{d_i^2}{(n^3 - n)}; \quad (3)$$

критерий И. И. Поляка. По методике И. И. Поляка требуется выполнение следующих условий –

$$\bar{\sigma}^2 < \sigma^2; \quad |a_1| > 2\sigma_{a1}. \quad (4)$$

В таблице 2 приведены результаты, полученные по коэффициентам корреляции и по методике И. И. Поляка.

Таблица 2
Оценка значимости линейного тренда годовых ЭВБ в бассейне реки Хуанхэ

Элементы водного баланса	Оценка тренда					
	По коэффициенту корреляции				По методике И. И. Поляка	
	R	σ_R	$2\sigma_R$	$K_D \geq 2$	$\bar{\sigma}^2 < \sigma^2$ (1)	$ a_1 < 2\sigma_{a1}$ (2)
1	2	3	4	5	6	7
Бассейн верхнего течения Хуанхэ						
РГ	- 0,09	0,14	0,28	0,64	5695 < 5743	- 0,48 <
РГ	- 0,27	0,13	0,26	2,01	224 < 242	- 0,29 <
ЕГ	0,11	0,14	0,28	0,74	6531 < 6605	0,60 <
Бассейн среднего течения Хуанхэ						
РГ	- 0,15	0,14	0,28	1,07	15060 < 15414	- 1,32 <
РГ	- 0,27	0,13	0,26	2,01	224 < 242	- 0,29 <
ЕГ	0,12	0,14	0,28	0,83	12679 < 12859	0,94 <

Анализ тенденции изменения элементов водного баланса показывает, что для района верхнего течения реки Хуанхэ характерно снижение речного стока за исследуемый период на 14 мм / 49 лет. В то же время таким элементам водного баланса, как атмосферные осадки, свойственно умеренное снижение, а испарению и изменению влагозапасов свойственно увеличение – за рассматриваемый период осадки уменьшились на 23 мм / 49 лет, испарение увеличилось на 29 мм / 49 лет, и бассейновые влагозапасы, которые уча-

ствуют в компенсации как испарения, так и речного стока, увеличились на 38 мм / 49 лет. Изменения ЭВБ происходят в среднем течении Хуанхэ. Как видно из табл. 3, за рассматриваемый период атмосферные осадки уменьшаются на 63 мм / 49 лет. Аналогичная тенденция наблюдается в динамике речного стока, уменьшение которого составляет 14 мм / 49 лет. Суммарное испарение и изменение бассейновых влагозапасов за рассматриваемый период увеличивается соответственно на 45 мм / 49 лет и 94 мм / 49 лет.

Таблица 3
Величина изменения элементов водного баланса бассейна реки Хуанхэ за период 1951/1952–1999/2000 годов, мм/год

Бассейн верхнего течения Хуанхэ				
Период наблюдения n, лет	РГ	РГ	ЕГ	VG
49	-23,42	-14,08	28,91	37,80
10	-4,36	-2,64	5,42	7,08
Бассейн среднего течения Хуанхэ				
49	-63,23	-14,08	45,00	94,15
10	-11,85	-2,64	8,45	17,65

Многолетние колебания реки Хуанхэ в верхнем и среднем течении приведены на рисунках 2 и 3. Как видно из этих рисунков, атмосферные осадки и речной сток имеют тенденцию к уменьшению, а суммарному испарению и изменениям

бассейновых влагозапасов свойственно повышение.

Для выявления и оценки цикличности колебаний годового цикла элементов водного баланса реки Хуанхэ применялись разностные интегральные кривые.

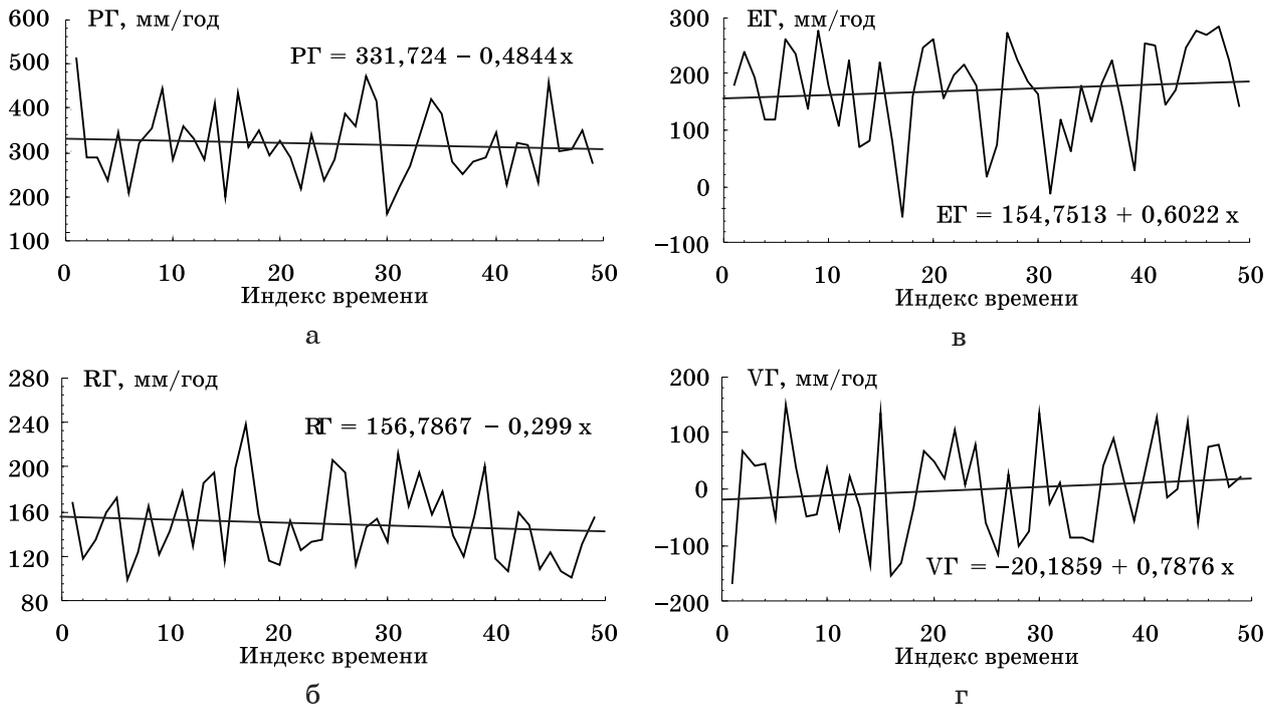


Рис. 2. Графики многолетнего колебания элементов водного баланса в бассейне верхнего течения реки Хуанхэ за период 1951/1952–1999/2000 годов (пояснения в приложении к таблице на с. 65)

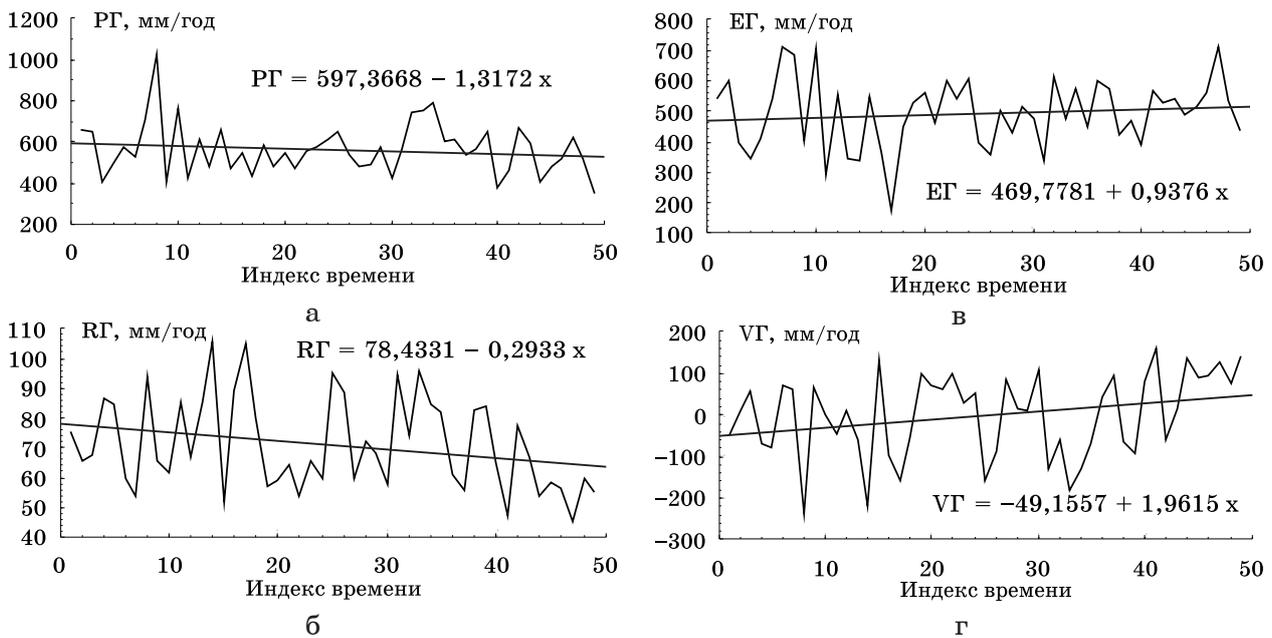
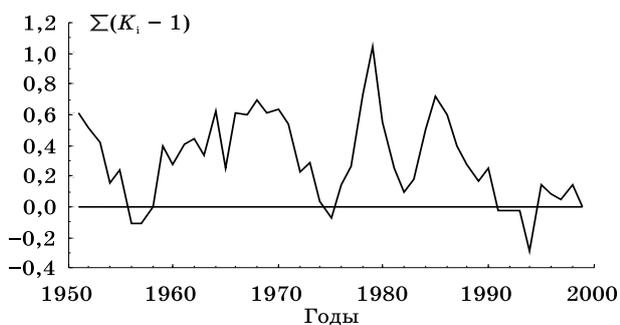


Рис. 3. Графики многолетнего колебания элементов водного баланса в бассейне среднего течения реки Хуанхэ за период 1951/1952–1999/2000 годов

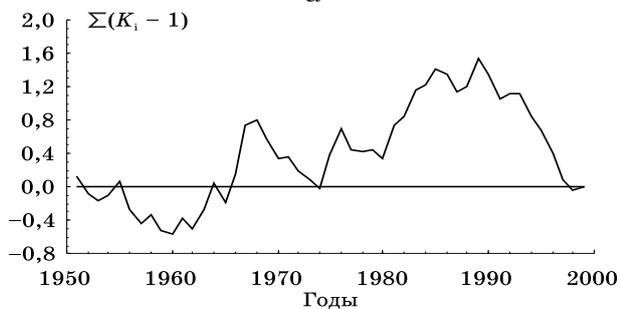
Интегральные кривые годовых циклов ЭВБ реки Хуанхэ построены для различных створов, характеризующих формирование элементов водного баланса на верхнем и среднем течении Хуанхэ. Полные циклы изменения увлажненности территории бассейна реки Хуанхэ приведены на рисунках 4 и 5.

Разностная интегральная кривая годового стока реки Хуанхэ в створе

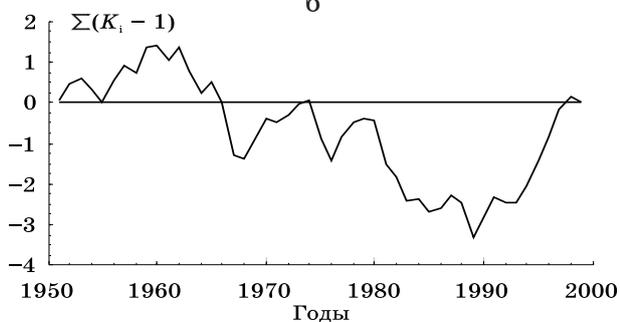
Ланьчжоу (в верхнем течении Хуанхэ) за период с 1951 по 2000 год имеет несколько циклов различной продолжительности: период повышения стока с 1960/1961 до 1989/1990 года, а с 1990/1991 года и до настоящего времени – понижение годового стока при снижении естественной увлажненности территории бассейна и увеличении годового испарения. В бассейне среднего течения реки Хуанхэ



а



б



в

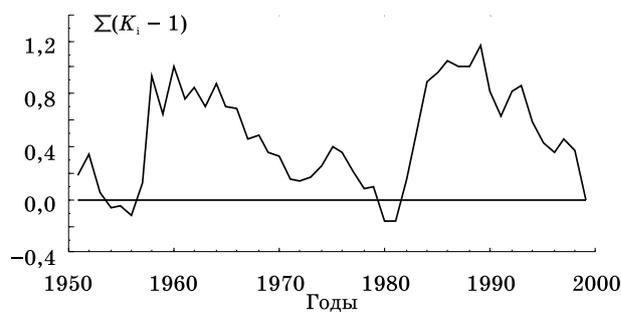
Рис. 4. Разностные интегральные кривые элементов водного баланса в бассейне верхнего течения реки Хуанхе за период 1951/1952–1999/2000 годов: а – атмосферные осадки; б – речной сток; в – суммарное испарение

наблюдается повышение годового стока в период с 1960/1961 по 1985/1986 год. С 1989/1990 года до настоящего времени имеет место понижение годового стока, суммарное испарение, наоборот, снижается в период с 1960/1961 до 1981/1982 года, а с 1982/1983 года и до настоящего времени имеет тенденцию к повышению.

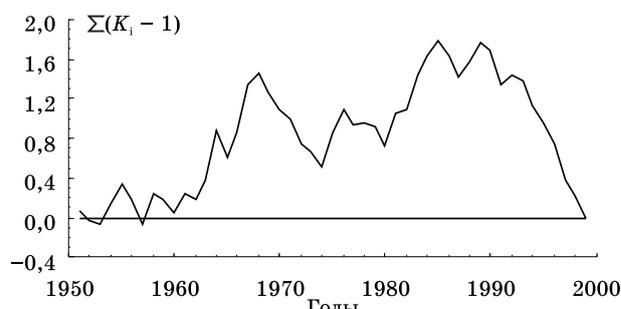
Разностные интегральные кривые показывают, что наблюдаются синхронные изменения годовых атмосферных осадков и речного стока реки Хуанхэ: с увеличением речного стока за период с 1960/1961 до 1989/1990 года происходит уменьшение испарения с поверхности суши водосбора реки Хуанхэ.

Выводы

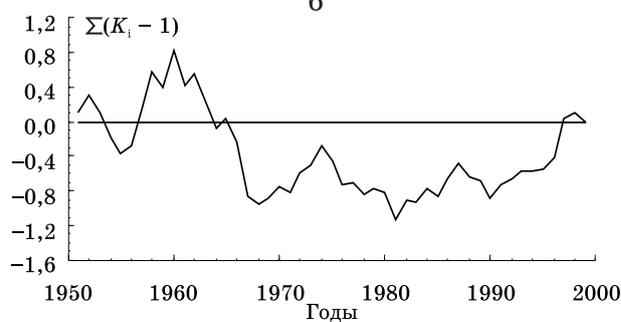
Анализ пространной изменчивости элементов водного баланса (атмосферных



а



б



в

Рис. 5. Разностные интегральные кривые элементов водного баланса в бассейне среднего течения реки Хуанхе за период 1951/1952–1999/2000 годов: а – атмосферные осадки; б – речной сток; в – суммарное испарение

осадков, речного стока, суммарного испарения, бассейновых влагозапасов) бассейна реки Хуанхэ показывает, что в динамике элементов водного баланса бассейна Хуанхэ выделяются периоды, для которых степень расхождения значений их параметров статистически значима, что подтверждает гипотезу о нестационарности временных рядов элементов водного баланса.

Анализ тенденции изменения ЭВБ показывает, что для района верхнего течения реки Хуанхэ характерно снижение речного стока за исследуемый период – на 14 мм за 49 лет.

Годовым атмосферным осадкам свойственно умеренное снижение, а испарению и изменению влагозапасов – увеличение: за рассматриваемый период 49 лет

осадки уменьшились на 23 мм, испарение увеличилось на 29 мм и бассейновые влагозапасы, которые участвуют в компенсации как испарения, так и речного стока, увеличились на 38 мм.

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

2. Водные ресурсы России и их использование: монография / Под ред. И. А. Шикломанова. – СПб: Гос. гидрол. институт, 2008. – 600 с.

Материал поступил в редакцию 10.07.14.

Исмайылов Габил Худуш оглы, доктор технических наук, профессор

E-mail: Ism37@mail.ru

Кун Сянцзюань, аспирантка

E-mail: kethy123@yandex.ru

УДК 502/504:556.16

Г. Х. ИСМАЙЫЛОВ, А. В. ПЕРМИНОВ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева»
Институт природообустройства имени А. Н. Костякова

АЛГОРИТМ РЕЖИМА РАБОТЫ СИСТЕМ ВОДОХРАНИЛИЩ СЕЗОННОГО И МНОГОЛЕТНЕГО РЕГУЛИРОВАНИЯ РЕЧНОГО СТОКА

Рассматриваются вопросы построения алгоритма определения режима эксплуатации водохранилища и системы водохранилищ, работающих при сезонном и многолетнем регулировании речного стока. Особенности данного алгоритма в том, что он учитывает многокритериальный аспект задачи управления водными ресурсами и наличие многолетней составляющей при регулировании речного стока. Структура алгоритма позволяет использовать хорошо зарекомендовавшие принципы потоковых задач.

Стационарные процессы, имитационная модель, алгоритм максимального потока, водохранилище, система водохранилищ, водопользователи.

The paper deals with the construction of the algorithm for determining the mode of operation of the reservoir (reservoir system) working in seasonal and long-term regulation of the river flow. Features of this algorithm are that it takes into account the multi-criteria aspect of the problem of water management and availability of long-term component of the regulation of the river flow. The structure of the algorithm allows using of well-established principles of flow problems.

Stationary processes, simulation model, algorithm of maximum flow, reservoir, system of reservoirs, water users.

Одной из центральных задач при исследовании закономерностей функционирования водно-ресурсной системы (ВРС) является взаимосогласование требований водопотребителей и производительности водоохраных комплексов с режимом речного стока и стока возвратных вод. Основной инструмент решения этой задачи – имитационная модель функционирования ВРС с учетом режима работы водоохраных комплексов. Ядро этой модели – модель функционирования каскада

водохранилищ многоцелевого назначения.

Актуальным на сегодняшний день является усовершенствование модели функционирования систем водохранилищ в части включения в нее блока, учитывающего изменения показателей качества воды в реке и водохранилище и на этой основе управление одновременно режимом и качеством воды (под управлением качеством воды понимается комплекс мероприятий, включая ассимилирующую (саморегулирующую и самоочищающую)