

Выводы

Возведение дамбы – это инструмент регуляции структуры речной системы через понижение ее фрактальной размерности. Существенным при этом является то обстоятельство, что намыв дамбы не разрушает сложившейся целостности компонентов среды, а лишь увеличивает ее эластичность за счет создания дополнительных центров устойчивости вмещающей среды. Этому во многом способствует очистка русла от донных отложений в процессе намыва дамбы, что значительно улучшает русловую гидродинамику реки.

1. Министерство по чрезвычайным ситуациям: Официальный сайт. – URL: www.mchs.gov.ru (дата обращения 5.11.13).

2. Калуж Ю. А., Логинов В. М., Чупикова С. А. Использование технологий ГИС при анализе фрактальных характеристик речной сети Тувы // Геоинформатика. – 2005. – № 4. – С. 31–40.

3. Ignasio Rodrigues, Andrea Rinaldo. Fractal River Basins. Chance and Self-Organization. – Cambridge university press, 2001. – 547 p.

4. Насонов А. Н., Сметанин В. И. Топологическое моделирование природно-техногенных систем // Природообустройство. – 2013. – № 1. – С. 11–16.

5. Тищенко Н. Н., Цветков И. В. Фрактальный анализ речных систем Тверской области. Моделирование сложных систем: сб. науч. трудов. – Тверь: Изд-во

ТьГУ, 1998. – Вып. 1. – С. 134–144.

6. Цветков И. В. Использование фрактальных временных рядов в комплексном анализе речных систем: Моделирование сложных систем: сб. науч. трудов – Тверь: Изд-во ТьГУ, 1998. – Вып. 1. – С. 145–155.

7. Сметанин В. И., Жогин И. М. Методы и средства гидромеханизации в составе мероприятий по защите территорий от наводнений // Природообустройство. – 2013. – № 2. – С. 80–83.

Материал поступил 21.11.13.

Сметанин Владимир Иванович, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Организация и технологии строительства объектов природообустройства»
Тел. 8-926-798-51-97

E-mail: smetanin2000@yandex.ru

Цветков Илья Викторович, доктор технических наук, доцент кафедры «Экономика и управление производством»

Тел. 8-910-646-12-30

E-mail: mancu@mail.ru

Насонов Андрей Николаевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Организация и технологии строительства объектов природообустройства»

Тел. 8-926-207-09-54

E-mail: andrenas22@yandex.ru

Жогин Иван Михайлович, инженер

Тел. 8-916-541-42-32

E-mail: zhogi.nivan@yandex.ru

УДК 502/504.064.2

О. А. ФЕДОТОВА

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

АНАЛИЗ И ОЦЕНКА ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ БАСЕЙНА ВЕРХНЕЙ ВОЛГИ В УСЛОВИЯХ ПОТЕПЛЕНИЯ КЛИМАТА*

Приведены результаты анализа и оценки гидрометеорологических характеристик за периоды весеннего половодья и межени по четырем частным водосборам и в целом по бассейну Верхней Волги. Рассмотрена динамика пространственно-временной изменчивости речного стока и определяющих его климатических факторов – атмосферных осадков и температуры воздуха.

Бассейн Верхней Волги, климат, речной сток, линейный тренд, ранговый критерий.

There are given results of the analysis and assessment of hydrometeorological characteristics for the period of spring floods and low water on four private water catchment basins and in whole on the Upper Volga basin. The dynamics of the spatial-temporal variability of river runoff and its defining climatic factors, such as precipitation and air temperature is considered.

The Upper Volga basin, climate, river runoff, linear trend, rank criteria.

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

Речные бассейны и формирующийся в них сток, который служит основным источником водных ресурсов – наиболее значимые объекты изучения в гидрологии. Отличие речного стока от других видов природных ресурсов заключается в непрерывном его возобновлении в процессе круговорота воды на Земле. Возросшие в различных отраслях экономики потребности в воде, наметившееся истощение водных ресурсов – факторы, которые стали определяющими при изучении речного стока как одного из элементов водного баланса в тесной взаимосвязи с климатом и ландшафтом. Целесообразно изучать весь гидрологический цикл, совершающийся в речном бассейне, включая изменение во времени и пространстве атмосферных осадков и температуры воздуха.

Основу такого подхода к изучению гидрологических процессов составляет уравнение водного баланса, основанное на законе сохранения материи и энергии, решение которого позволяет оценить соотношение и взаимосвязь отдельных компонентов гидрологического цикла в речном бассейне. Чем детальнее будет изучена пространственно-временная изменчивость речного стока и определяющих его климатических факторов – температуры воздуха и атмосферных осадков, тем надежнее удастся выявить изменение гидрологического режима водных объектов в условиях возможного изменения климата.

Автором выполнены работы по оценке пространственно-временной изменчивости гидрометеорологических характеристик в бассейне Верхней Волги.

В качестве объекта исследования выбран

бассейн Верхней Волги. Волга – крупнейшая река Европы, национальная гордость России – занимает пятое место по водности среди рек Российской Федерации. Общая длина Волги 3531 км, в пределах Верхне-Волжского бассейна – 1570 км. Волжский бассейн является важнейшим в экономическом отношении регионом России, а вместе с Каспийским морем образует уникальную природную систему – Волго-Каспийский бассейн. Общая площадь водосбора бассейна Волги составляет 1 630 000 км², в пределах Верхне-Волжского бассейна – 604 000 км² [1]. Бассейн Верхней Волги включает в себя частные водосборы следующих водохранилищ: Иваньковского, Нижегородского, Рыбинского, Угличского.

Для выявления пространственно-временной изменчивости речного стока, температуры воздуха и атмосферных осадков были получены временные ряды за период с 1914/1915 по 2010/2011 годы ($n = 97$ лет) по четырем частным водосборам бассейна Верхней Волги за период половодья, межени и года в целом.

В качестве исходной гидрометеорологической информации использованы данные наблюдений за месячными и годовыми суммами атмосферных осадков на 11 метеостанциях и за речным стоком на 20 гидрологических постах, находящихся на рассматриваемых частных водосборах бассейна Верхней Волги.

Для всех рассматриваемых временных рядов были определены выборочные оценки основных статистических параметров: среднееголетнее значение, стандартное отклонение, коэффициент вариации, коэффициент асимметрии и автокорреляции (таблицы 1...4).

Таблица 1
Статистические параметры ЭВБ частного водосбора Иваньковского водохранилища бассейна Верхней Волги за 1914/1915–2010/2011 годы, мм

Статистический параметр	$P_{год}$	$P_{тепл.}$	$P_{хол.}$	$R_{год}$	$R_{весна}$	$R_{межень}$
Среднеголетнее значение	717	475	242	212	117	95
Стандартное отклонение σ	90	78	48	60	38	49
Коэффициент вариации C_v	0,12	0,16	0,20	0,30	0,32	0,51
Коэффициент асимметрии C_s	0,24	0,33	0,40	0,60	0,65	1,03
Коэффициент автокорреляции r [1]	0,10	0,04	0,25	0,26	0,12	0,26

Примечания: $P_{год}$ – суммарные годовые атмосферные осадки; $P_{тепл.}$ – атмосферные осадки за теплый период; $P_{хол.}$ – атмосферные осадки за холодный период; $R_{год}$ – годовой речной сток; $R_{весна}$ – речной сток в период весеннего половодья; $R_{межень}$ – речной сток в период межени.

Таблица 2
Статистические параметры ЭВБ частного водосбора Нижегородского водохранилища бассейна Верхней Волги за 1914/1915–2010/2011 годы, мм

Статистический параметр	$P_{год}$	$P_{тепл.}$	$P_{хол.}$	$R_{год}$	$R_{весна}$	$R_{межень}$
Среднеголетнее значение	612	422	191	243	149	94
Стандартное отклонение σ	72	64	35	68	40	48
Коэффициент вариации C_v	0,12	0,15	0,20	0,28	0,27	0,51
Коэффициент асимметрии C_s	0,24	0,30	0,40	0,56	0,54	1,02
Коэффициент автокорреляции r [1]	0,08	0,09	- 0,004	0,47	0,17	0,37

Таблица 3

Статистические параметры ЭВБ частного водосбора Рыбинского водохранилища бассейна Верхней Волги за 1914/1915–2010/2011 годы, мм

Статистический параметр	$P_{\text{год}}$	$P_{\text{тепл.}}$	$P_{\text{хол.}}$	$R_{\text{год}}$	$R_{\text{весна}}$	$R_{\text{межень}}$
Среднегодовое значение	676	457	219	202	109	94
Стандартное отклонение σ	80	67	38	58	32	43
Коэффициент вариации C_v	0,12	0,14	0,17	0,29	0,29	0,46
Коэффициент асимметрии C_s	0,24	0,29	0,34	0,58	0,59	0,91
Коэффициент автокорреляции r [1]	0,13	0,17	0,11	0,37	0,10	0,19

Таблица 4

Статистические параметры ЭВБ частного водосбора Угличского водохранилища бассейна Верхней Волги за 1914/1915–2010/2011 годы, мм

Статистический параметр	$P_{\text{год}}$	$P_{\text{тепл.}}$	$P_{\text{хол.}}$	$R_{\text{год}}$	$R_{\text{весна}}$	$R_{\text{межень}}$
Среднегодовое значение	687	457	232	91	55	36
Стандартное отклонение σ	88	73	45	29	19	23
Коэффициент вариации C_v	0,12	0,16	0,19	0,32	0,34	0,64
Коэффициент асимметрии C_s	0,25	0,32	0,38	0,64	0,69	1,28
Коэффициент автокорреляции r [1]	0,16	0,18	0,23	0,37	-0,12	0,37

Изменение годовых сумм атмосферных осадков в бассейне Верхней Волги происходит в диапазоне от 717 (частный водосбор Иваньковского водохранилища) до 612 мм/год (частный водосбор Нижегородского водохранилища): в теплый период – от 475 (частный водосбор Иваньковского водохранилища) до 422 мм/год (частный водосбор Нижегородского водохранилища); в холодный период – от 242 (частный водосбор Иваньковского водохранилища) до 191 мм/год (частный водосбор Нижегородского водохранилища).

Колебание среднегодовых величин стока происходит в диапазоне от 243 (частный водосбор Нижегородского водохранилища) до 91 мм/год (частный водосбор Угличского водохранилища): в период весеннего половодья – от 149 (частный водосбор Нижегородского водохранилища) до 55 мм/год (частный водосбор Угличского водохранилища); в период межени – от 95 (частный водосбор Иваньковского водохранилища) до 36 мм/год (частный водосбор Угличского водохранилища).

Изменчивость атмосферных осадков теплого периода колеблется от 0,16 (частный водосбор Иваньковского водохранилища) до 0,14 (частный водосбор Рыбинского водохранилища) и осадков холодного периода соответственно от 0,20 (частный водосбор Иваньковского водохранилища) и до 0,17 (частный водосбор Рыбинского водохранилища).

Коэффициент вариации среднегодовых величин стока Верхней Волги изменяется от 0,32 (частный водосбор Угличского водохранилища) до 0,28 (частный водосбор Нижегородского водохранилища): для периода весеннего половодья – от 0,34 (частный водосбор Угличского водохранилища) до 0,27 (частный водосбор Нижегородского водохранилища); для периода межени – от

0,64 (частный водосбор Угличского водохранилища) до 0,46 (частный водосбор Рыбинского водохранилища).

Внутрирядная связь годовых сумм осадков смежных лет в исследуемых временных рядах изменяется от 0,16 (частный водосбор Угличского водохранилища) до 0,02 (частный водосбор Нижегородского водохранилища).

При изучении динамики колебаний гидрометеорологических величин часто отмечаются однонаправленные изменения их величин под действием одного или нескольких факторов в течение какого-либо периода. Эти изменения (тренды) либо их тенденции требуют анализа достоверности их наличия. Для проверки наличия линейного тренда использована методика И. И. Поляка, применяемая в гидрологии и метеорологии [3]. По этой методике, основанной на проверке статистической значимости параметров тренда, рассчитывается уравнение линейной регрессии следующего вида:

$$Y(t) = a_0 + a_1 t, \tag{1}$$

где $Y(t)$ – значение исследуемых водных ресурсов (речного бассейна или бассейна моря); t – порядковый номер наблюдаемой величины; a_0 и a_1 – регрессионные коэффициенты.

Для принятия гипотезы о наличии линейного тренда по методике И. И. Поляка требуется выполнение следующих условий:

$$\bar{\sigma}^2 < \sigma^2; \quad |a_1| > 2 \sigma_{a1}, \tag{2}$$

где $\bar{\sigma}^2$ – дисперсия наблюдаемых величин от среднего значения; σ^2 – дисперсия отклонения наблюдаемых величин от линии тренда, которая определяется так:

$$\bar{\sigma}^2 = \sigma^2(1-R^2), \tag{3}$$

где R – коэффициент корреляции между наблюдаемой величиной и ее порядковым номером; σ_{a1} – среднее квадратическое отклонение регрессионного коэффициента a_1 :

$$\sigma_{a1} = \sqrt{\frac{12}{n(n-1)}}\sigma. \quad (4)$$

Если условия не выполняются, то линейный тренд является незначимым с вероятностью 5 %.

Для оценки тренда применяют также ранговый критерий Спирмэна [3]:

$$\hat{\rho} = 1 - 6 \sum_{i=1}^n d_i^2 / (n^3 - n), \quad (5)$$

где d_i – разность между порядковым номером и рангом каждого хронологического значения ряда длиной n .

По методикам И. И. Поляка и Спирмэна (на примере частного водосбора Ивановского водохранилища) установлено наличие слабовыраженного тренда во временных рядах годовых атмосферных осадков (РГ), годовом стоке (РГ).

Статистически значимый тренд наблюдается при среднегодовой температуре воздуха (ТГ) (табл. 5).

Таблица 5

Значения статистических критериев для оценки значимости линейного тренда временных рядов ЭВБ частного водосбора Ивановского водохранилища бассейна Верхней Волги

Исследуемая величина	Критерий Спирмэна	Критерий И. И. Поляка 1) $\bar{\sigma}^2 < \sigma^2$; 2) $ a_1 > 2 \sigma_{a1}$,
РГ	0,014	1) $\bar{\sigma}^2 = 8092 < \sigma^2 = 8100$; 2) $ a_1 = 0,12 < \sigma_{a1} = 6,4$
РГ	0,135	1) $\bar{\sigma}^2 = 3484 < \sigma^2 = 3552$; 2) $ a_1 = 0,3 < \sigma_{a1} = 4,3$
ТГ	0,391	1) $\bar{\sigma}^2 = 1,03 < \sigma^2 = 1,10$; 2) $ a_1 = 0,01 < \sigma_{a1} = 0,07$

Анализ тенденции изменения ЭВБ показывает, что для частного водосбора Ивановского водохранилища бассейна Верхней Волги в период весеннего половодья характерно снижение речного стока за исследуемый период (1914/15–2010/11) на 30 мм за 97 лет, тогда как в период межени наблюдается увеличение речного стока на 59 мм за тот же пери-

од, годовой сток также увеличивается и составляет 30 мм за 97 лет. Аналогично можно проследить незначительное увеличение годовых атмосферных осадков за исследуемый период – 11 мм за 97 лет, за холодный период происходит небольшое уменьшение – 15 мм за 97 лет, за теплый период отмечается рост атмосферных осадков на 21 мм за 97 лет (рис. 1).

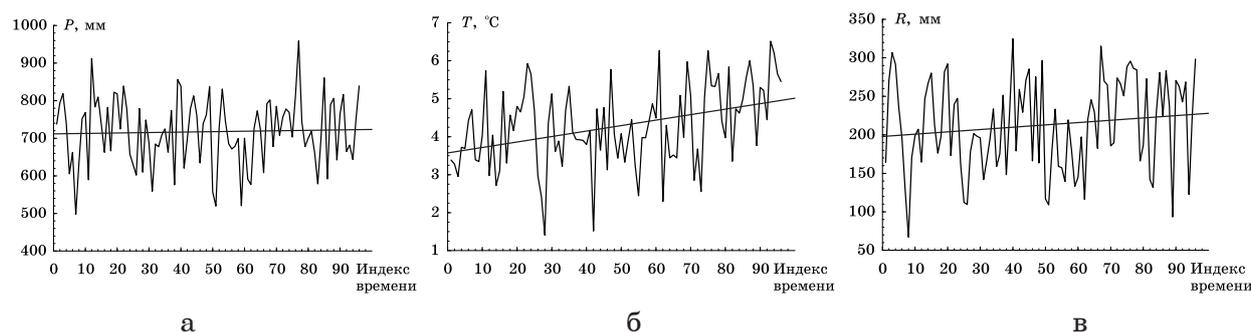


Рис. 1. Колебания годовых значений ЭВБ частного водосбора Ивановского водохранилища за период 1914/15–2010/11 годов: а – атмосферные осадки; б – температура воздуха; в – речной сток

Как видно из рисунка 2, период снижения годового стока (1914–1975 годы) соответствует периоду пониженной увлажненности территории бассейна (1914–1975 годы). В этот период среднегодовая температура воздуха имеет тенденцию к снижению. С конца

70-х годов увлажненность территории возрастает, из-за чего увеличивается годовой сток.

Анализ межрядной взаимосвязи ЭВБ частного водосбора Ивановского водохранилища за исследуемый период показал, что наиболее тесная

корреляционная связь прослеживается между годовым стоком и атмосферными осадками ($r = 0,65$), а также между

стоком за период межени и атмосферными осадками теплого периода ($r = 0,71$).

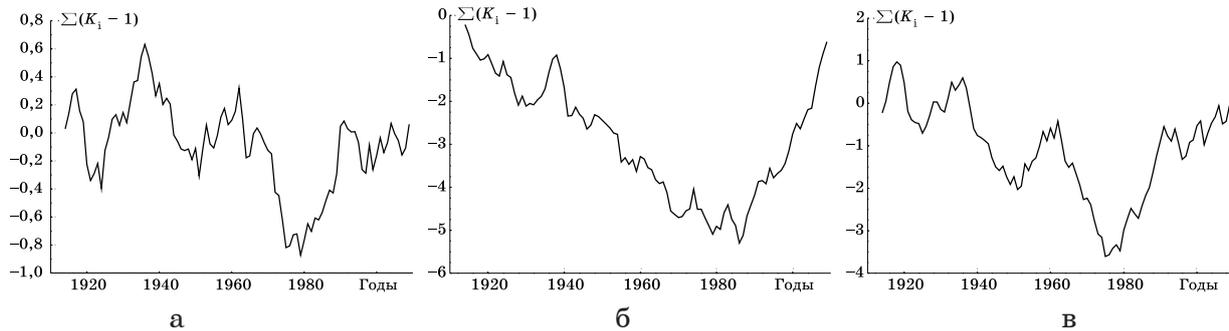


Рис. 2. Разностные интегральные кривые годовых величин ЭВБ частного водосбора Иваньковского водохранилища за период 1914/15-2010/11 годов: а – атмосферные осадки; б – температура воздуха; в – речной сток

Таблица 6

Матрица парных коэффициентов корреляции гидрометеорологических характеристик частного водосбора Иваньковского водохранилища за период 1914/15–2010/11 годов

Исследуемая величина	$P_{\text{хол.}}$	$P_{\text{тепл.}}$	РГ	RB	RM	РГ	$T_{\text{хол.}}$	$T_{\text{тепл.}}$	ТГ
$P_{\text{хол.}}$	1,00	-0,06	0,38	0,31	-0,001	0,19	-0,04	-0,08	-0,11
$P_{\text{тепл.}}$		1,00	0,83	0,06	0,71	0,62	-0,05	-0,20	0,05
РГ			1,00	0,19	0,65	0,65	-0,007	-0,17	0,04
RB				1,00	-0,07	0,57	-0,13	-0,28	-0,11
RM					1,00	0,77	0,23	-0,04	0,38
РГ						1,00	0,10	-0,21	0,23
$T_{\text{хол.}}$							1,00	0,35	0,84
$T_{\text{тепл.}}$								1,00	0,32
ТГ									1,00

Выводы

Проведенный анализ гидрометеорологических характеристик в бассейне Верхней Волги за 100-летний исследуемый период позволил выявить рост атмосферных осадков и осадков теплого периода и тенденцию к снижению осадков холодного периода.

Анализ тенденции изменения стока реки Волги за периоды весеннего половодья, межени и года в целом показывает, что для района Верхней Волги (периода межени и года в целом) характерно увеличение речного стока соответственно на 59 и 30 мм за 97 лет (сток весеннего половодья за такой же период снижается на 30 мм). Вместе с тем, выявленные изменения годового стока Верхней Волги синхронны увлажнению территории бассейна.

Наблюдающиеся в последние десятилетия климатические изменения проявились и в бассейне Верхней Волги. За столетний исследуемый период среднегодовая температура воздуха увеличилась на 1,5 °С, но еще больший рост температуры наблюдался в холодный период года и составил 2,0 °С. Коэффициент линейного тренда среднегодовой температуры воздуха, характеризующий

скорость потепления, составляет 0,15 °С за 10 лет.

По методикам И. И. Поляка и Спирмэна установлено наличие слабовыраженного тренда во временных рядах годовых атмосферных осадков и годовом стоке.

Исследования показали, что в бассейне Верхней Волги прослеживается тесная корреляционная связь между речным стоком межени и годовым стоком, а также между годовыми атмосферными осадками и годовым стоком.

1. Дементьев В. С. Мониторинг поверхностных водных объектов. Оценка качества вод. – Нижний Новгород: Крона-2, 2008. – 276 с.

2. Шелутко В. А. Численные методы в гидрологии. – Л.: Гидрометеиздат, 1991. – 236 с.

3. Шикломанов И. А. Водные ресурсы России и их использование. – СПб: ГГИ, 2008. – 600 с.

Материал поступил в редакцию 05.09.13.
Федотова Ольга Александровна, аспирантка
 Тел. 8 (925) 288-59-57
 E-mail: olg21796677@yandex.ru