

ресечете на натурные условия, дали вполне согласующиеся результаты по скоростям течения и времени водообмена.

Литература

1. *Ержан К.Т., Кузенбаев К.М.* Стратегия управления водными ресурсами бассейна реки Сырдарья // Энергетика, телекоммуникации и высшее образование в современных условиях. Труды конференции. – Алматы, 2004. – 175 с.
2. Наставление Гидрометеорологическим станциям и постам. – Л.: Гидрометеоиздат, 1957. Вып. 6, Ч.1. – С 32-131.
3. *Маневич Я.З.* О гидравлическом моделировании с искажением масштабов моделей. - Изв. ВНИИГ, Л.: 1977, т.115, С. 67-72.
4. *Сабанеев А.А.* Универсальная формула для коэффициента Шези, Известия ВНИИГ, т.32, 1947. – С.27-44.
5. *Хофман В.Д.* Машинные методы математических вычислений. – М.: Мир, 1980. –278 с.
6. *Латышенкова А.М.* Формирования характеристик расхода воды в реках и озерах. – Л.: Гидрометеоиздат, 1984. – С.54-89.
7. *Чугаев Р.Р.* Гидравлика. Л.: Гидрометеоиздат, 1975. С.85-100.

АНАЛИЗ ДИНАМИКИ ГОДОВОГО ПРИТОКА В РЫБИНСКОЕ ВОДОХРАНИЛИЩЕ И ЕГО МОДЕЛИРОВАНИЕ⁸

Литвинов А.С., Кучай Л.А., Соколова Е.Н.
Институт биологии внутренних вод им И.Д. Папанина РАН, Борок
litvinov@ibiw.yaroslavl.ru

В настоящее время все большее внимание уделяется естественным причинам изменения климата и природной среды Земли в целом и их региональному отражению. Факт глобального потепления в XX веке фиксируется с семидесятых годов столетия. Потепление глобального климата приводит к изменению циркуляционных процессов в атмосфере и, как следствие, водных ресурсов бассейнов рек, в первую очередь подверженных воздействию климатических факторов.

⁸Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект №14-05-00346).

Материалом для анализа изменений стока Верхней Волги в створе Рыбинского гидроузла послужили данные водного баланса водохранилища за период с 1947-2013 гг., вычисляемый Рыбинской ГМО, и восстановленные данные по притоку в водохранилище за период с 1881 по 1940 гг. [1].

Речной сток непрерывно изменяется во времени в зависимости от колебания климатических факторов и увлажненности территории. За период с 1881 по 2013 гг. отмечено 18 экстремально многоводных и 12 маловодных лет в 4-х многоводных и 4-х маловодных периодах различной продолжительности (рис. 1). При этом минимальный приток составлял 12.2 км^3 , максимальный – 53.4 км^3 при средней величине 31.4 км^3 . В целом за период 1890-2013 гг. наблюдается слабая тенденция увеличения стока.

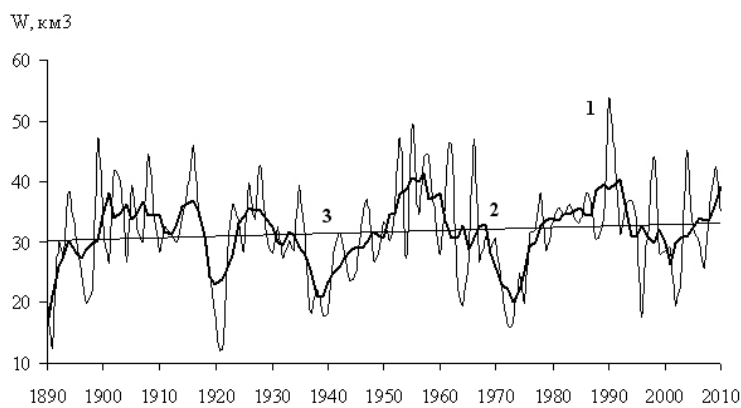


Рис. 1 – Приток в Рыбинское водохранилище: 1-1890-2010 гг.;
2- то же, сглажено с периодом осреднения 5 лет; 3 – линия тренда

За период нормальной эксплуатации водохранилища (1947-2013 гг.) минимальный приток составлял 16.2 км^3 , максимальный – $53,4 \text{ км}^3$, при этом, отмечено два маловодных и три многоводных периода. Экстремально многоводных лет было 11, экстремально маловодных – 6; их максимальные различия в объеме притока – 37.19 км^3 .

Анализ колебаний стока рек в Верхнее-Волжском бассейне за период нормальной эксплуатации водохранилища показывает, что для всего водосбора одновременно многоводными были 1955-1958 гг., а маловодными – 1971-1975 гг. В промежуточные годы, на фоне общей тенденции уменьшения стока, наблюдались отдельные

нарушения синхронности колебаний водного режима, т.е. увеличение расходов на одних реках могло сопровождаться уменьшением на других.

В период 2000-2013 гг. в бассейне водохранилища минимальный поверхностный приток составлял 18.73 км³, максимальный – 45.17 км³ (табл. 1). В 2000–2003 гг. водность была ниже средней, 2002 год – экстремально маловодный. С 2004 г., водность превышала среднюю (за исключением 2006 и 2008 гг.). 2004 год был экстремально многоводный. Различия в объеме притока между экстремальными годами (2002 и 2004) составили 26.44 км³.

Таблица 1 – Характеристики основных составляющих водного баланса Рыбинского водохранилища за 2000-2013 гг., км³

| Годы | Приход | | | Расход | | |
|---------|--------|--------|-------|--------|-----------|-------|
| | Приток | Осадки | Σ | Сброс | Испарение | Σ |
| 2000 | 28.50 | 2.11 | 30.61 | 25.61 | 1.79 | 27.40 |
| 2001 | 29.10 | 2.16 | 31.26 | 31.87 | 1.72 | 33.59 |
| 2002 | 18.73 | 1.62 | 20.35 | 22.21 | 1.75 | 23.96 |
| 2003 | 26.26 | 2.16 | 28.42 | 18.55 | 0.96 | 19.51 |
| 2004 | 45.17 | 2.90 | 48.07 | 45.5 | 1.26 | 46.76 |
| 2005 | 33.89 | 1.72 | 35.61 | 38.72 | 1.48 | 40.20 |
| 2006 | 29.83 | 2.55 | 32.38 | 21.83 | 1.47 | 23.30 |
| 2007 | 26.00 | 2.68 | 28.68 | 31.86 | 1.70 | 33.56 |
| 2008 | 35.50 | 2.33 | 37.83 | 27.52 | 1.80 | 29.32 |
| 2009 | 42.48 | 2.58 | 45.06 | 42.47 | 1.77 | 44.24 |
| 2010 | 34.89 | 2.82 | 37.71 | 38.31 | 1.42 | 39.73 |
| 2011 | 33.98 | 2.20 | 36.18 | 33.33 | 1.80 | 35.13 |
| 2012 | 42.640 | 3.09 | 45.73 | 38.00 | 1.74 | 39.74 |
| 2013 | 38.94 | 1.97 | 40.91 | 42.40 | 1.10 | 43.50 |
| Среднее | 32.84 | 2.35 | 35.19 | 32.73 | 1.55 | 34.28 |

Для оценки периодов многоводных и маловодных лет различной продолжительности в многолетней динамике годового притока в Рыбинское водохранилище был построен теоретический ряд притока большей продолжительности, который по своим статистическим характеристикам соответствует исходному ряду фактических наблюдений. Эта идея лежит в основе метода статистических испытаний (метода Монте-Карло), который используется в различных областях физики, химии, математики, экономики. Основан он на кибернетической идее “черного ящика”, смысл которой состоит в том, что исследуемый процесс моделируется путем многократного повторения его случайных реализаций [2].

Колебания годового стока (так же, как и других его характеристик) во времени рассматриваются как случайные, т.е. обусловленные изменениями большого числа действующих факторов (запаса влаги в бассейне, температуры, осадков), которые в свою очередь вызваны рядом других действующих факторов (радиационным балансом, теплообменом с атмосферой, циркуляцией воздушных масс). В основу моделирования рядов годового стока положено предположение, что распределение вероятности случайных величин, установленное по ряду фактических данных, сохраняется за пределами этого ряда [3].

Модельный ряд строится с использованием кривой обеспеченности стока и серии случайных чисел, равномерно распределенных в интервале (0;1), принимающихся за обеспеченности годовых величин стока на основании одного и того же закона распределения этих величин. Для построения теоретического ряда годового стока необходимыми статистическими параметрами служили: среднее значение ряда (W_{cp}), стандартное отклонение (σ), коэффициент вариации (C_v) и коэффициент асимметрии (C_s), которые определялись по исходному ряду наблюдений.

При асимметричном распределении исходного ряда кривая распределения приводится к симметричной (нормальной) с помощью различных преобразований. Распределение рассматриваемых нами рядов притока в Рыбинское водохранилище принимается за симметричное: его модальное значение практически совпадает с центральным значением, а медианная точка сдвинута чуть вправо.

Построение биномиальной кривой в интегральном виде (кривой обеспеченности) может быть произведено при помощи таблицы интеграла биномиальной кривой, в которой приводятся нормированные значения ординат кривой

$$Y_i = F(P, C_s) = (K_i - 1) / C_v \quad (1)$$

Здесь K_i – модульный коэффициент стока, i – число членов ряда обеспеченности, C_s и C_v – коэффициенты асимметрии и вариации, соответственно [4]. Отсюда следует:

$$K_i(P_i) = Y_i \cdot C_v + 1 \quad (2)$$

Алгоритм моделирования представляется следующей схемой:
 - серия псевдослучайных чисел ξ_i , вырабатываемых датчиком случайных чисел, равномерно распределенных в интервале (0;1), принимается за ряд обеспеченности притока – P_i ;

- по заданным величинам обеспеченности (P_i) и величины C_s определяются ординаты кривой Фостера-Рыбкина по таблице для $C_v=1$;

- по формуле (2) определяется $K_i(P_i)$ (модульный коэффициент) с поправкой на величину C_v ряда наблюдений и производится сдвиг на 1, так как таблица построена для ряда модульных коэффициентов с началом координат в 1;

- полученный ряд модульного коэффициента умножается на среднюю величину притока, в результате чего определяется теоретический ряд величин годового притока.

С помощью модельного ряда, состоящего из 1000 членов, может быть произведена оценка периодов различной продолжительности водности и уточнена кривая обеспеченности притока в Рыбинское водохранилище.

В табл. 2 представлены статистические характеристики рядов наблюдения притока и теоретического ряда. Расхождения наблюдаются в величинах минимального и максимального притока, в связи с чем изменяется значение C_s и теоретическая кривая обеспеченности уходит дальше при очень малых и очень больших значениях обеспеченности стока ($P<5\%$, $P>95\%$) (см. рис. 2).

Таблица 2 – Статистические характеристики модельного ряда и рядов наблюдений годового притока в Рыбинское водохранилище

| Ряды наблюдений | Характеристики | | | | | | |
|-------------------------------|----------------|-----------------|------------|------------------|------------|-------|-------|
| | N | W_{\min} | W_{\max} | $W_{\text{ср.}}$ | σ_w | C_s | C_v |
| | | км ³ | | | | | |
| Ряд наблюдений I (1947-2012) | 66 | 16.199 | 53.39 | 32.963 | 8.1 | 0.198 | 0.246 |
| Ряд наблюдений II (1890-2012) | 123 | 12.204 | 53.39 | 31.727 | 8.03 | 0.196 | 0.253 |
| Теоретический ряд (модель) | 1000 | 10.136 | 61.475 | 32.476 | 7.92 | 0.194 | 0.244 |

Для исходных рядов характерно преобладание периодов с притоком выше среднего: 58% против 44%, приходящихся на маловодные годы. В модели также отмечено преобладание периодов с объемом притока выше среднего: 55% против 49.5%, приходящихся на маловодные периоды. При этом выявлены маловодные периоды: 12-ти, 16-ти и 18-ти лет (в рядах наблюдений) и 11-ти, 14-ти и 24-х лет (в модели); многоводные периоды: 9-ти, 16-17, 27 лет (в рядах

наблюдений) и 9-ти, 19-ти и 25 лет (в модели). Указанные характеристики приведены в табл. 3.

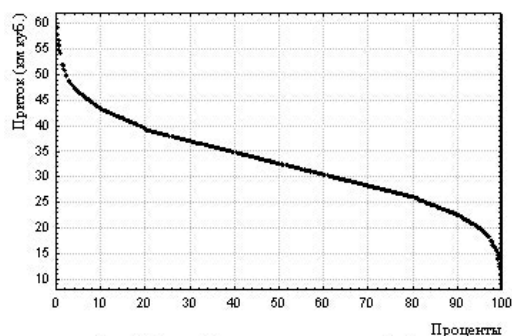


Рис.2 – Кривая обеспеченности притока в Рыбинское водохранилище (модель)

Таблица 3 – Продолжительность периодов водности в анализируемых рядах

| Годы | 1890-1901 | 1902-1928 | 1929-1946 | 1947-1962 | 1963-1977 | 1978-1995 | 1996-2003 | 2004-2012 |
|-------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Продолжительность периодов водности | 12 | 27 | 18 | 16 | 16 | 17 | 8 | 9 |
| Модульный коэффициент стока K_i | <1 | >1 | <1 | >1 | <1 | >1 | <1 | >1 |

Кроме того, анализ показал, что наиболее вероятной группировкой маловодных и многоводных периодов является период продолжительностью в 18-19 лет. Необходимо отметить одну особенность, которая наблюдается в каждом из отмеченных продолжительных периодах – наличие группы лет (продолжительностью 3-4 года) с модульным коэффициентом, близким к среднему. Это означает, что в многоводном периоде непременно есть группа лет с модульным коэффициентом <1, и, наоборот – в маловодном периоде присутствует группа лет с модульным коэффициентом >1.

В заключение отметим, что теоретический ряд притока, обладающий теми же статистическими параметрами, что и наблюдаемый, может быть служить входной информацией для разрабатываемой имитационной модели экосистемы водохранилища.

Литература

1. Бюрик Р.Ф. Приток и сток Рыбинского водохранилища// Труды ГГИ. Рыбинское водохранилище. Вып. 7, ч. II. Гидрометеоиздат. 1950. С.134-178.

2. *Войтишек А.В., Михайлов Г.А.* Численное статистическое моделирование: Метод Монте-Карло. ИЦ Академия. 2006. С.368.
3. *Сванидзе Г.Г.* Основные расчеты регулирования речного стока методом Монте-Карло. Тбилиси. Мецинереба. 1964
4. *Соколовский Д.Л.* Речной сток. – Л.: Гидрометеониздат. 1968. С. 491.

ДОЛГОСРОЧНЫЙ АНСАМБЛЕВЫЙ ПРОГНОЗ ВЕСЕННЕГО ПОЛОВОДЬЯ И ЛЕТНЕЙ МЕЖЕНИ НА ОСНОВЕ ДИНАМИКО-СТОХАСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ФОРМИРОВАНИЯ РЕЧНОГО СТОКА⁹

Морейдо В.М.

Институт водных проблем РАН, г. Москва
moreido@mail.ru

Введение. Долгосрочное (квартальное, сезонное) прогнозирование притока воды к водохранилищам является важным фактором повышения эффективности управления водохозяйственными системами. При регулировании стока зачастую требуется решить сложную задачу сохранения бесперебойной выработки электроэнергии на ГЭС и водоснабжения потребителей, при условии сохранения режима экологического стока для обводнения поймы в весенний период и поддержания уровней воды в период навигации [1]. Все это делает задачу долгосрочного прогнозирования притока чрезвычайно актуальной.

В последнее время в мировой практике долгосрочного гидрологического прогнозирования происходит постепенный переход от традиционно применяемых детерминистических прогнозов речного стока с использованием эмпирических (регрессионных, физико-статистических) зависимостей между стоком и стокообразующими факторами [2; 3] к ансамблевым прогнозам с использованием моделей формирования речного стока [4–6]. При использовании последнего подхода в качестве начальных условий в модели задаются: измеренные или рассчитанные на дату выпуска прогноза данные о предшествующем состоянии водосбора (характеристики снежного

⁹ Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект №13-05-00562).