

Расчет и прогноз суточного бокового притока воды в Горьковское водохранилище в период половодья на основе моделей формирования стока

В 70-е годы прошлого столетия в Гидрометцентре СССР был разработан метод краткосрочного прогноза бокового притока воды в Горьковское водохранилище с использованием одной из первых моделей формирования талого стока [1]. Однако этот метод не нашел применения в оперативной практике Верхне-Волжского УГМС, поскольку:

- технология составления прогноза была весьма громоздкой, поэтому систематический выпуск прогноза в оперативном режиме был затруднен из-за отсутствия требуемых исходных данных и вычислительной техники;
- модель формирования талого стока, лежащая в основе метода, имела существенные недостатки при определении потерь стока, что нередко приводило к значительным ошибкам прогноза.

В связи с перечисленными обстоятельствами была поставлена задача разработать в Гидрометцентре России новый метод расчета и прогноза суточного бокового притока воды в Горьковское водохранилище в период весеннего половодья с использованием более совершенной модели формирования стока и с учетом возможностей представляемых современными вычислительными средствами для организации обработки информации. В частности, для сбора и обработки информации на базе ПЭВМ была реализована технологическая линия выпуска краткосрочных прогнозов расходов и уровней воды с использованием сетевого доступа к оперативным базам данных суперЭВМ CRAY.

Предложенный метод позволяет:

- рассчитывать фактический ежедневный боковой приток в водохранилище по гидрометрическим данным;
- выпускать прогнозы суточного бокового притока с заблаговременностью до 5 сут для периода половодья и до конца второго квартала с учетом реальных возможностей прогноза температуры воздуха и осадков;
- сопоставлять ежедневные величины фактического и прогнозируемого бокового притока, а также осуществлять корректировку прогноза.

Краткие сведения о водохранилище и физико-географическая характеристика его водосбора

Объем водохранилища при подпорном горизонте (НПГ) с отметкой 84,0 м абс. составляет 10,5 км³, а полезный – 3,0 км³. Водоохранилище относится к речному типу, вытянуто по длине на 440 км.

Весь приток воды к створу Горьковской ГЭС с общего водосбора 229000 км² складывается из зарегулированного стока с площади 150000 км² (65 %), бокового притока с площади 77250 км² (34%) и притока воды непосредственно на зеркало водохранилища, имеющее площадь равную 1750 км² (около 1 %). Карта бассейна водохранилища представлена на рисунке.

В водохранилище впадает около трех десятков рек, наиболее значительными из них являются Унжа, Кострома, Которосль и Немда, суммарная площадь водосборов которых соответственно равна 56670 км² или 72% от всей площади формирования незарегулированного стока. На долю остальных небольших рек приходится 28%.

Водосбор водохранилища сильно ассиметричен, на его левобережную часть приходится 61450 км² (80%), а на правобережную – 15800 км² (20%). Поэтому естественно, что основная часть бокового притока в водохранилище поступает с левобережной части водосбора водохранилища.

Рельеф водосбора пологоволнистый, близкий к равнинному. Наибольшая высота достигает 200-300 м в приводораздельных зонах, относящихся к Галичско-Чухломской и Ростовско-Нерехтинской грядам.

Залесенность бассейна велика, особенно в его левобережной части. В то же время ее распределение по территории весьма неравномерно. Наименьший процент залесенности относится к небольшим бассейнам, а наибольший – к левобережным водосборам рек Кострома, Немда и Унжа. Значительная часть лесных массивов и особенно в левобережье представлена хвойными породами. Лиственные леса распространены в основном на небольших бассейнах рек, а также на правобережье.

Почвы на большей части бассейна слабопроницаемые, глинистые и суглинистые. Лишь в южной части водосбора р. Унжа – подзолистые, супесчаные и песчаные.

Годовое количество осадков в бассейне в среднем составляет около 550 мм; в зимнее время – 110-190 мм; в период весеннего половодья – 50-60 мм.

Обычно весеннее половодье общего притока воды начинается в первой декаде апреля и заканчивается в начале июня. Нередко на его форме сказываются возвраты холодов, а также наложение дождей паводков.

По данным за 1974-1983 гг. средняя продолжительность половодья общего притока воды составляет два месяца, при этом наиболее раннее его начало наблюдалось в 1975 г. (20 марта), а самое позднее его окончание – в 1974 г. (20 июня).



Схема водосбора водохранилища Горьковской ГЭС

▼ - гидрологические посты;

○ - метеостанции;

I, ... , VII – номера районов.

Наиболее полные сведения о водохранилище и его водосборе приведены в работе [1].

Исходные гидрометеорологические данные, используемые в работе

При выполнении настоящей работы был собран и проанализирован большой объем гидрометеорологических данных, при этом использовалась только сеть информационных станций и постов. Все расчеты выполнены по материалам наблюдений за 10-летний период (с 1973 по 1983 г.), которые содержат гидрологические сведения по 31 гидроствору, а также метеорологическую информацию по 14 станциям.

Гидрологическая информация включает ежедневные данные о расходах воды за март-июнь каждого года, а в комплект метеорологических данных входят сведения о ежедневных осадках за январь-декабрь, ежедневных температуре и дефиците влажности воздуха за март-июнь, сведения о декадной температуре и дефиците влажности воздуха за июль-декабрь и январь-февраль, а также сведения о запасах воды в снежном покрове и датах схода снега в поле и в лесу. Для задания параметров модели и выбора констант использовались данные гидрофизических характеристик бассейна, а также обобщенные гидрологические характеристики, приведенные в работе [1].

В связи с тем, что освещенность территории данными метеорологических наблюдений недостаточна, при проведении расчетов кроме данных наблюдений на станциях, расположенных в пределах водосбора, привлекались данные наблюдений пунктов, находящихся за его пределами. Списки пунктов наблюдений, данные которых использовались в работе, представлены в табл. 1 и табл. 2, а их расположение показано на рисунке.

Методы расчета фактического ежедневного бокового притока воды в водохранилище в период половодья

Обычно одновременно с разработкой метода краткосрочного прогноза суточного бокового притока в водохранилище предлагается также метод расчета фактического притока. Результаты таких расчетов служат исходными данными для разработки метода прогноза.

Методы расчета бокового притока воды в водохранилище, как правило, основаны на двух подходах: первый из них - на приближенном решении уравнения водного баланса водохранилища относительно его составляющей, учитывающей боковой приток, а второй – на учете расходов воды рек, впадающих в водохранилище. Расходы воды этих рек используются также для оценки притока с неосвещенной данными наблюдений части его водосбора. Опыт показал, что методы, основанные на уравнении водного баланса, дают удовлетворительные результаты для крупных водохранилищ за достаточно длинные отрезки времени, начиная с декады.

Для расчета притока за суточные интервалы времени часто применяется второй подход. Он дает удовлетворительные результаты при хорошей освещенности данными гидрометрических наблюдений значительной части водосбора водохранилища (70-80%), как это имеет место в случае рассматриваемого водохранилища.

Начиная с 1961 г. в Верхне-Волжском УГМС расчет ежедневных величин бокового притока в Горьковское водохранилище производился по схеме, именуемой «детальной» или «полной». Схема предусматривала суммирование ежедневных расходов воды по 38 створам

рек, впадающих в водохранилище. Промежуточный приток с неосвещенной данными измерений площади каждой реки определялся с помощью площадных коэффициентов k_f . Наблюдения на ряде этих рек производились только в период весеннего половодья.

В 1971 г. в Гидрометцентре СССР была также разработана детальная схема [1], заметно отличающаяся от схемы Верхне-Волжского УГМС. В частности в ней предусматривалось использование данных только постоянно действующих гидростворов, а сток с неосвещенных данными измерений площадей учитывался по 15 более или менее однородным районам.

Таблица 1

Перечень рек, данные о расходах воды которых использованы в работе

Номер п/п	Наименование реки и замыкающего створа	Куда впадает река	Площадь бассейна, км ²		Залесенность, %
			до зам. створа	до устья	
1	Которосль-Гаврилов Ям	водохранилище	4980	7150	40
2	Черемуха-Дмитриевка	водохранилище	455	1665	58
3	Урдома-Белятино	водохранилище	345	1380	50
4	Печегда-Чебаково	водохранилище	288	288	45
5	Касть-Рылово	водохранилище	356	1558	53
6	Обнора-Шарна	р.Кострому	1800	2445	70
7	Соть-Верхний Жар	р.Кострому	683	2050	66
8	Шача-Рябцево	р.Кострому	809	1500	45
9	Андоба-Любимцево	р.Кострому	484	1070	55
10	Межа-Ямково	водохранилище	843	1390	50
11	Кострома-Буй	водохранилище	8870	-	75
12	Тebза-Борок	р.Кострому	1010	1760	60
13	Немда-Селище	водохранилище	3810	6309	70
14	Мера-Мало-Березово	водохранилище	820	3119	70
15	Медоза-Заборье	р.Меру	724	782	70
16	Сендега-Покровская	р.Меру	232	466	70
17	Нерехта-Нерехта	р.Солоницу	307	307	45
18	Покша-Рыжково	водохранилище	501	501	50
19	Стежера-Шолохово	водохранилище	212	212	31
20	Сунжа-Ново-Писцево	водохранилище	326	533	20
21	Шача-Приволжск	водохранилище	601	601	25
22	Унжа-Макарьев	водохранилище	18500	19330	80
23	Нея-Буслаево	р.Унжу	5700	6060	80
24	Белый Лух-Тимошино	р.Унжу	452	1022	90
25	Черный Лух-Юрово	р.Унжу	429	944	85
26	Лоймина-Георгиевское	водохранилище	161	240	25
27	Кострома-Гнездииково	водохранилище	800	-	80
28	Унжа-Кологрив	водохранилище	11500	-	85
29	Унжа-Мантурово	водохранилище	16200	-	80
30	Вига-Шартаново	р.Унжу	1870	-	80
31	Межа-Загатино	р.Унжу	2120	-	80

Список метеорологических станций, данные которых использованы в работе

Станция	Метеорологический элемент			
	температура воздуха	осадки	дефицит влажности воздуха	снежный покров
Ростов	+	+	+	+
Ярославль	+	+	+	+
Тутаев	+	+	+	+
Данилов	+	+	+	+
Кострома	+	+	+	+
Приволжск	+	+	+	+
Буй	+	+	+	+
Галич	+	+	+	+
Чухлома	+	+	+	+
Макарьев	+	+	+	+
Кинешма	+	+	+	+
Юрьево	+	+	+	+
Пыщуг	+	+	+	+
Николо-Полома	+	+	+	+

За последние 10-15 лет сеть действующих гидростворов в бассейне водохранилища была заметно сокращена. В связи с этим в настоящее время детальные методы расчета бокового притока не используются, а применяются так называемые упрощенные схемы расчета. В данном случае в Верхне-Волжском УГМС применяется схема расчета, основанная на данных о ежедневных расходах 31 гидроствора, из которых 5 действуют только в период половодья.

В процессе выполнения настоящей работы в Гидрометцентре России предложен также упрощенный способ расчета бокового притока воды. Он основан на данных 26 гидростворов с учетом разбиения бассейна водохранилища на 7 районов, показанных на рисунке, а некоторые сведения о них представлены в табл.3.

Таблица 3

Краткие сведения о районах водосбора Горьковского водохранилища, используемых в схеме расчета бокового притока

Номер района	Число гидростворов, по которым рассчитывается приток с района	Площадь, освещенная данными измерений расходов воды, км ²	Площадь района, км ²	Освещенность районов данными измерений расходов воды, %	Площадной коэффициент района	Залесенность района, %
I	1	4980	6410	77,7	1,29	40
II	10	3930	11860	33,1	3,02	45
III	8	6395	13160	48,6	2,05	65
IV	2	9880	11160	88,5	1,13	75
V	2	9510	11780	80,7	1,24	75
VI	1	18500	18500	100	1,00	75
VII	3	1327	4380	31,3	3,20	65
Итого	27	54560	77250	70,6	-	

Примечание. Для прогноза расходов воды по VI району (бассейн р.Унжи) требуются данные по четырем верхним гидростворам, с учетом которых для данной работы требуются сведения по 31 гидроствору.

Исходя из данных о стоке по районам, практический расчет бокового суточного притока воды в водохранилище предложено производить по следующей формуле

$$\begin{aligned}
 Q_{\text{притока}, t} = & 1,29 Q_{\text{Которосль}, t-1} + 3,02 (Q_{\text{Черемуха}, t} + Q_{\text{Урдома}, t} + Q_{\text{Печегда}, t} + Q_{\text{Касть}, t} + Q_{\text{Сендега}, t} + \\
 & + Q_{\text{Нерехта}, t} + Q_{\text{Нерехта}, t-1} + Q_{\text{Шача-Приволжск}, t-1} + Q_{\text{Покиа}, t} + Q_{\text{Стежера}, t} + Q_{\text{Сунжа}, t}) + \\
 & + 2,05 (Q_{\text{Обнора}, t-2} + Q_{\text{Соть}, t-1} + Q_{\text{Шача-Рябцево}, t-2} + Q_{\text{Андоба}, t-1} + Q_{\text{Меза}, t} + \\
 & + Q_{\text{Мера}, t} + Q_{\text{Медоза}, t} + Q_{\text{Сендега}, t}) + 1,13 (Q_{\text{Кострома}, t-3} + Q_{\text{Тибза}, t-3}) + \\
 & + 1,24 (Q_{\text{Немда}, t-1} + Q_{\text{Нея}, t-1}) + Q_{\text{Унжа}, t-1} + \\
 & + 3,20 (Q_{\text{Белый Лух}, t-1} + Q_{\text{Черный Лух}, t} + Q_{\text{Лоймина}, t} + Q_{\text{Сунжа}, t}), \quad (1)
 \end{aligned}$$

где $Q_{\text{притока}, t}$ – суточный боковой приток, м³/с; Q – расход воды по определенному створу названной реки; $t, t-1, t-2, t-3$ – моменты времени, которым соответствуют используемые значения расходов воды.

Расчеты ежедневного бокового притока по формуле (1) выполнены за март-июнь 1974 - 1983 гг. как для всего водохранилища, так и для каждого из шести районов. В качестве притока с VI района (нумерация районов дана в табл. 3) приняты ежедневные расходы воды р. Унжи в створе г. Макарьев. В данной работе большой интерес представляет оценка точности расчета величин ежедневного бокового притока, вычисленных по указанной формуле. Поскольку для определения указанной точности расчета бокового притока эталонные данные отсутствуют, оценка этих расчетов сделана путем их сравнения с результатами, полученными по достаточно надежному детальному методу, разработанному в Гидрометцентре СССР в 1971 г. [1]. Это сравнение показало, что вычисленные величины бокового притока по двум указанным методам различаются друг от друга незначительно. Как указывалось выше, кроме общего бокового притока воды в водохранилище вычислены и проанализированы также величины притока с I-V и VII районов (частных бассейнов) за указанное десятилетие.

Опираясь на изложенные в работе [1] исследования точности расчетов суточного притока воды в Горьковское водохранилище, можно полагать, что погрешности расчетов притока со II, III и VII районов довольно значительны и могут достигать 20-25%. Это обусловлено недостаточной освещенностью территории указанных районов данными гидрометрических измерений, что хорошо видно из данных табл. 3. В то же время следует подчеркнуть, что для I, IV, V и тем более VI районов, освещенных данными измерений расходов воды более чем на 85%, точность расчетов ежедневного притока весьма высока и приближается к точности нахождения среднесуточных расходов воды, представленных в гидрологических ежегодниках. На основании выводов, сделанных в работе [1], можно полагать, что точность расчета суточного бокового притока в целом для рассматриваемого водохранилища составляет около 10%.

Краткая характеристика режима притока воды в водохранилище за период половодья

Результаты расчетов незарегулированного притока по вышеизложенной методике, а также сведения о сбросах Рыбинской и Горьковской ГЭС дали возможность рассмотреть как общий приток воды в водохранилище, так и его составляющие. Общий приток складывается из бокового (незарегулированного); сбросов Рыбинского водохранилища (зарегулированного притока), осадков, выпадающих на зеркало водохранилища. Последняя составляющая незначительна, по сравнению с двумя первыми и в данной работе она не рассматривается.

Анализ имеющихся данных о боковом притоке показал, что его режим обуславливается многими факторами, основными из которых являются следующие.

1. Небольшая регулирующая способность многих речных систем и особенно рек, входящих во II и VII районы. Площади водосборов этих рек составляют менее 1000 км².
2. Весьма большая поверхностная регулирующая емкость на водосборах I и VI районов, в первом из которых она связана со значительной озерностью, а во втором – залесенностью.
3. Неодновременность начала снеготаяния в различных частях бассейна водохранилища. Обычно снеготаяние в южных районах (I, II и VII) наблюдается на 3-5 дней раньше, чем на остальной территории. Кроме того, снеготаяние нередко прерывается возвратами холодов.

Первые два из перечисленных факторов практически постоянны, а поэтому, с некоторыми допущениями, можно отметить, что в формировании гидрографа половодья (бокового притока) они ежегодно играют одну и ту же роль.

Поскольку перечисленные факторы формирования бокового притока являются взаимосвязанными, на гидрографе общего притока трудно выделить особенности, обусловленные влиянием каждого из них. Вместе с тем определенно можно заметить, что ход суточной температуры воздуха во время снеготаяния оказывает существенное влияние на форму всего бокового притока. Рассмотрим это влияние на примере многоводных лет (1974 и 1979 гг.).

При практически одинаковых запасах воды в снеге этих лет (121 и 128 мм), а также объемах притока (14,81 и 12,84 км³) гидрографы половодья резко отличаются друг от друга. В 1974 г. снеготаяние в период с 15 марта и до 25 апреля пять раз прерывалось возвратами холодов. В результате такого хода суточной температуры воздуха средняя интенсивность снеготаяния была невелика и на гидрографе этого года образовалась «полка» с расходами воды около 2000 м³/с и продолжительностью более 20 дней. К моменту установления устойчивой и значительной положительной температуры воздуха (26 апреля 1974 г.) запасы воды в оставшемся на водосборе снеге были невелики. В 1979 г. возвраты холодов наблюдались только дважды и снеготаяние к моменту установления устойчивой температуры воздуха (26 апреля 1979 г.) были весьма значительны. В результате такого хода температуры воздуха в 1974 г. максимальный и средний суточный приток воды соответственно составил 4630 и 2290 м³/с, а в 1979 г. – 8150 и 3160 м³/с. В 1974 г. половодье продолжалось 75 суток, а в 1979 г. – 47 суток.

Влияние отдельных из перечисленных факторов более четко прослеживается на гидрографах бокового притока конкретных районов. Так, например, гидрограф притока с I района сильно выположен и растянут во времени более чем на два месяца. На нем трудно заметить влияние возвратов холодов и жидких осадков. Максимальные ежедневные величины притока, по сравнению с другими районами, являются самыми низкими. Это в основном связано с регулирующим влиянием озера, расположенного в бассейне р. Которосль.

Следует также отметить, что максимальные расходы притока воды в различных частях водосбора водохранилища формируются одновременно. Раньше чем в других районах эти максимумы отмечаются во II, а позже других – в VI районе (бассейн р. Унжи). Причем максимальные расходы воды р. Унжи наблюдаются на 4-5 дней позже даты максимального значения всего бокового притока воды в водохранилище. Из этого следует, что расходы воды р. Унжи практически не участвуют в формировании максимального бокового притока воды в водохранилище.

Анализ весеннего стока показал, что его формирование по территории бассейна водохранилища происходит неравномерно. Например, площадь бассейна и объем половодья р. Унжи до г. Макарьев (район VI) соответственно составляют 24 и 29% от всей площади водосбора водохранилища и общего объема весеннего притока воды в него. В то же время для V района (бассейны рек Немды и Неи) указанные характеристики соответственно равны 15,3 и 12,7%. Таким образом, в первом случае на каждый процент площади VI района приходится 1,21% общего бокового притока, а во втором (V район) – только 0,8%. В целом

можно отметить, что районы, расположенные в южной части бассейна водохранилища, имеют меньшую удельную водность по сравнению с районами, расположенными севернее.

Осредненные характеристики бокового притока, зарегулированного и общего притока воды в водохранилище представлены в табл. 4.

Из табл. 4 видно:

- объем зарегулированного притока в среднем почти в 5 раз меньше объема бокового притока, их средние величины за 10 лет соответственно равны 2,4 и 11,0 км³;
- объем сбросов Горьковской ГЭС весьма велик и в среднем составляет 10,2 км³, он лишь на 0,8 км³ меньше бокового притока (в то же время в 3 года из 10 сбросы этой ГЭС за период половодья превышали объем незарегулированного бокового притока);
- объемы сбросов Рыбинской и Горьковской ГЭС обуславливаются величиной бокового притока за половодье, водохозяйственными нуждами и полезными объемами водохранилищ ГЭС, величины которых соответственно равны 16,67 и 3,0 км³;
- объемы бокового притока в многоводные и маловодные годы значительно отличаются от обычных лет, поэтому надо полагать, что роль гидрологических прогнозов в такие годы весьма велика.

Таблица 4

Сведения об основных годовых составляющих водного баланса водохранилища за период половодья 1974-1983 гг.

Годы	Объем общего весенне го приток а, км ³	Объем бокового притока		Объем сбросов Рыбинской ГЭС		Объем сбросов Горьковской ГЭС		Объем воды, аккумулированно й водохранилище за половодье	
		км ³	% общего притока	км ³	% общего притока	км ³	% общего притока	км ³	% общего притока
1974	16.44	14.81	90.1	1.625	9.9	12.96	78.8	3.48	21.2
1975	8.02	6.29	78.4	1.731	21.6	6.29	78.4	1.73	21.6
1976	11.95	10.70	89.5	1.253	10.5	6.28	52.6	3.67	47.4
1977	8.48	7.16	84.4	1.316	15.6	5.02	59.2	3.46	40.8
1978	10.59	8.88	83.9	1.714	16.1	9.29	87.7	1.30	12.3
1979	17.83	12.94	72.6	4.893	27.4	14.19	79.6	3.64	20.4
1980	13.14	12.31	93.7	0.830	6.3	10.54	80.2	2.60	19.8
1981	17.76	13.85	78.0	3.910	22.0	13.74	77.4	4.02	22.6
1982	13.14	11.05	84.1	2.087	15.9	9.41	71.6	3.73	28.4
1983	16.20	11.57	71.4	4.626	28.6	12.10	74.7	4.10	25.3
Средн ее	13.40	11.00	82.1	2.40	17.9	10.18	76.0	3.22	24.0

Расчет расходов воды для частных бассейнов на основе моделей формирования стока

Довольно часто для потребителей водных ресурсов рек с зарегулированным стоком, требуются краткосрочные прогнозы (с заблаговременностью до 5 сут) ежедневного бокового притока воды в водохранилища в течение периода весеннего половодья. При решении таких задачи обычно используются следующие подходы:

- а) методы, основанные на моделях трансформации движения паводочной волны по руслам незарегулированных средних и крупных речных систем;
- б) методы, основанные на моделях формирования стока на сравнительно небольших речных бассейнах с площадями 5-10 тыс. км² при условии, что на период заблаговременности гидрологического прогноза имеется информация об ожидаемых температуре воздуха и осадках;
- в) методы, основанные на учете запасов воды в русловой сети.

За последние десятилетия при решении указанных задач чаще всего используются методы, перечисленные в пунктах а и б. Нередко они применяются в комбинации друг с другом.

В пределах водосбора Горьковского водохранилища выделено семь районов (частных бассейнов), ограниченных створами рек, где имеются измеренные расходы воды (обоснование такого деления дано выше). Шесть из них (I, II, III, IV, V и VII районы) являются частными бассейнами, для которых предусмотрено использование суммарных данных о расходах воды рек, впадающих в водохранилище. Расчеты гидрографов для этих бассейнов проводятся по модели формирования стока с использованием в качестве входной информации данных о метеорологических величинах (осадки, температура и дефицит влажности воздуха). Для одного частного бассейна (VI район - водосбор р. Унжа до г. Макарьва) расчеты выполняются по линейной модели трансформации расходов воды. Расчетные и прогнозные значения всего бокового притока в водохранилище находятся суммированием семи величин притока с каждого из частных бассейнов.

В настоящее время в Гидрометцентре России в оперативной практике широко используется модель формирования талого, дождевого и смешанного стока, описание которой дано в работах [2-4]. Эта модель, совместно с линейной трансформационной моделью положена в основу системы непрерывного прогнозирования стока в крупных речных системах.

Успешность использования модели формирования стока при построении расчетных и прогностических схем зависит от ряда факторов, основными из которых являются:

- надежность определения параметров и констант модели при различных условиях формирования стока на водосборах;
- точность и полнота исходных гидрологических и метеорологических данных (в нашем случае большая часть гидрологических исходных данных характеризуется специфической особенностью: мы имеем дело не с конкретными расходами воды отдельных рек, а с величинами рассчитанного стока по районам);
- надежность краткосрочных прогнозов метеорологических элементов, включая ежедневную температуру воздуха и осадки.

При определении параметров использованы данные за пять из десяти имеющихся лет (зависимая выборка). При этом границы расчетного периода для всех, в том числе и независимых лет, задавались в соответствии с датами начала и окончания половодья. В принципе, расчеты по каждому из районов проводились независимо, но поскольку конечной расчетной величиной является общий приток к водохранилищу, эти даты были приняты едиными для всех шести частных водосборов его бассейна.

Для определения параметров модели для каждого района использовались данные наблюдений за осадками, температурой и дефицитом влажности воздуха, запасами воды в снежном покрове, а также рассчитанные ежедневные притоки каждого района. Метеорологическая информация представлялась в виде среднесуточных величин, осредненных для каждого частного водосбора по наблюдениям 14 станций, показанных на рисунке.

В качестве индекса начального увлажнения почвы (на 1 августа) принят средний по каждому частному водосбору расход воды за июль. Для характеристики возможного диапазона изменений начальной влажности используются максимальные и минимальные значения этого индекса за имеющийся период наблюдений.

По всем годам расчеты начинали с 1 августа и заканчивали 31 июля следующего года.

Для определения параметров использовались достаточно характерные по условиям формирования стока годы (многоводные и маловодные, с большими и малыми значениями снеготопавов и осадков, с большим диапазоном изменений характеристики влажности почвы). Часть из параметров задавалась, исходя из физико-географического анализа обобщенных данных и эмпирических зависимостей. Многие же параметры, отражающие в большой мере влияние локальных особенностей формирования стока, для каждого конкретного района определялись по данным гидрометеорологических наблюдений с помощью процедуры оптимизации, которая позволяет найти приближенные оценки параметров из условия наилучшего соответствия «фактических» и рассчитанных гидрографов. Для повышения надежности оценок параметров осуществлялся физический анализ полученных значений и, при необходимости, задавались возможные пределы их изменений.

Принятые значения параметров и констант модели формирования стока для рассматриваемых районов приведены в табл. 5.

Проверка надежности полученных значений параметров для рассматриваемых частных бассейнов Горьковского водохранилища проведена по данным гидрометеорологических наблюдений за период с 1974 по 1983 г. В качестве характеристики точности расчетов использовалась стандартная оценка s/σ (s - средняя квадратическая погрешность расчетов, σ - средняя квадратическая изменчивость ежедневных расходов воды за период половодья) [6]. Точность расчетов для всех частных бассейнов вполне приемлемая: средняя оценка s/σ за десять лет для I частного бассейна составляет 0,37, для II - 0,44, для III - 0,33, для IV - 0,38, для V - 0,30, для VII - 0,41.

Таблица 5

Параметры и константы модели формирования стока для частных бассейнов Горьковского водохранилища

№ п/п	Параметры и константы	Частные бассейны					
		I	II	III	IV	V	VII
1.	k - лес	15,2	9,66	15,9	13,3	13,2	7,98
2.	χ - лес	0,89	1,00	0,71	0,43	0,36	0,052
3.	i_0 - лес	0,19	0,48	4,31	1,78	0,14	0,70
4.	i_H	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
5.	τ_1	4,37	0,66	0,72	1,31	1,75	1,55
6.	τ_2	2,89	2,46	2,58	2,03	1,96	0,49
7.	$U_{кр}$ - поле	100	100	100	100	100	100
8.	ω_{max}	0,26	0,21	0,30	0,22	0,43	0,31
9.	k_2	0,025	0,023	0,020	0,025	0,025	0,025
10.	n_1	3,7	3,5	7,0	8,1	4,5	3,2
11.	n_2	4,0	4,3	2,8	6,6	4,3	3,8
12.	$1/\rho$ - лес	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77
13.	ω_0	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
14.	a - лес	1,43	1,36	1,39	1,49	1,32	2,02
15.	α - лес	11,0	11,0	11,0	11,0	11,0	11,0
16.	$3,5$	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5
17.	Z	50	50	50	50	50	50
18.	Γ	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13
19.	k - поле	8,74	7,26	8,43	2,47	1,25	1,82
20.	χ - поле	0,24	0,58	1,00	0,19	0,26	1,00

21.	i_0 – поле	0,89	1,24	0,41	0,49	0,52	0,31
22.	$1/\rho$ – поле	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62
23.	a – поле	3,39	2,68	2,33	2,78	4,06	3,31
24.	α – поле	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5
25.	m – лес	0,02	0,012	0,04	0,02	0,02	0,03
26.	m – поле	0,04	0,086	0,06	0,06	0,06	0,06
27.	T_p	0	0	0	-	-	-
28.	ξ	0	0	0	-	-	-
29.	F	6410	11860	13160	11860	11780	4380
30.	WK2	0,40	0,45	0,65	0,70	0,75	0,65
31.	Q_{MAX}	70,0	80,0	120,0	260,0	190,0	70,0
32.	Q_{MIN}	5,0	10,0	20,0	10,0	5,0	5,0
33.	KL	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60
34.	RT	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35
35.	WIDTH	0	0	0	0	0	0
36.	C3	30	30	30	30	30	30
37.	C4	50	50	50	50	50	50
38.	REGTP	0	0	0	0	0	0
39.	N4	1,0	1,0	1,0	1,5	1,5	1,5
40.	BDAY	10800	10800	10800	10800	10800	10800
41.	FLORA	LEPO	LEPO	LEPO	LEPO	LEPO	LEPO
42.	INPRS	SNOW	SNOW	SNOW	SNOW	SNOW	SNOW
43.	MOUNT	0	0	0	0	0	0
44.	IAL	3	3	3	3	3	3

Средняя квадратическая ошибка расчета расходов воды для указанных районов за период половодья соответственно равна 32,6, 174, 162, 147, 104 и 61,3 м³/с. Приведенные оценки точности расчета гидрографов стока в период половодья показывают, что параметры моделей частных бассейнов определены достаточно надежно.

Как уже указывалось ранее, приток с VI частного бассейна водосбора водохранилища оценивается по расходам воды р. Унжа в створе Макарьев. В основе расчета расходов воды этой реки лежит линейная модель трансформации водных масс в руслах рек с сосредоточенным боковым притоком [5]. Для реализации этой модели на рассматриваемом отрезке реки выделены 3 расчетных участка, для каждого из них определены параметры трансформации (n_i и τ_i) и коэффициенты стоковой приводки (κ_i). Параметры и коэффициенты представлены в табл. 6.

Таблица 6

Параметры модели трансформации (n_i и τ_i) и коэффициенты стоковой приводки (κ_i)
р.Унжа.

Номера расчетных участков	Замыкающий створ	Входной створ	Коэффициент стоковой приводки	Параметры	
				n_i	τ_i
1	Унжа-Кологрив	Вига-Шартаново	6,49	2,63	1,44
2	Унжа-Мантурово	Унжа-Кологрив	1,00	3,33	0,94
		Межа-Загатино	2,22	1,53	0,52
3	Унжа-Макарьев	Унжа-Мантурово	1,33	1,00	2,53

Проверка надежности полученных значений параметров на фактических ежедневных данных о расходах воды показала вполне удовлетворительные результаты расчетов гидрографов стока для всех створов (Кологрив, Мантурово и Макарьев).

Краткосрочный прогноз ежедневного бокового притока воды в водохранилище за период половодья

Прогностическая схема отличается от расчетной тем, что при ее реализации на период заблаговременности необходимо задать прогнозные значения метеорологических элементов – температуры воздуха, осадков и дефицита влажности воздуха для I, II, III, IV, V, VII частных бассейнов и расходов воды р. Унжи в створе Кологрив (VI частный бассейн). До даты выпуска прогноза используются фактические данные наблюдений. Кроме того, в прогностической схеме используют корректирующий оператор, позволяющий уточнять прогнозируемые значения расходов воды путем минимизации ошибки за несколько последних дней перед датой выпуска прогноза [5]. Использование корректирующего оператора приводит к заметному уточнению прогнозов для всех частных бассейнов, особенно при небольшой заблаговременности (1-2 сут).

Для определения эффективности методики были составлены проверочные прогнозы за все рассматриваемые годы. При реализации прогностической схемы в оперативном режиме метеорологические данные на период заблаговременности необходимо задавать исходя из краткосрочных прогнозов погоды. Однако мы не располагали данными метеорологических прогнозов и достоверными оценками таких прогнозов по рассматриваемому району. Поэтому оценки проверочных прогнозов для всех 6 частных бассейнов были получены при экстраполяции метеорологических данных на период заблаговременности: температура и дефицит влажности воздуха принимались равными значениям, наблюдаемым в день выпуска прогноза, осадки – равными нулю. Такая экстраполяция должна вносить дополнительную погрешность в прогноз.

При прогнозе для VI частного бассейна (р. Унжа) во входных створах до даты выпуска прогноза использовались фактические значения расходов воды. На период заблаговременности значения расходов воды в створе Кологрив задавались с помощью экстраполяции. Нами использовался разработанный ранее метод [5]. Прогнозные расходы воды в замыкающих створах верхних участков использовались в качестве входных данных на период заблаговременности для нижерасположенных участков.

Для сравнения, как принято, нами были составлены аналогичные прогнозы при задании на период заблаговременности фактических данных (расчетный вариант).

Проверочные прогнозы расходов воды за период половодья оценены по критерию s / σ_{Δ} . Для этой цели была определена средняя квадратическая изменчивость расходов воды (σ_{Δ}) для заблаговременностей от 1 до 5 сут для всех семи частных бассейнов по всей выборке за 10 лет, которая оказалась соответственно равной: для I частного бассейна - 15,2, 29,5, 43,0, 55,5, 67,1 м³/с; для II - 156, 282, 377, 448, 502 м³/с; для III - 146, 279, 393, 487, 561 м³/с; для IV - 111, 212, 304, 386, 458 м³/с, для V - 90,7, 172, 247, 315, 374 м³/с, для VI - 172, 331, 483, 628, 760 м³/с и для VII - 65,0, 112, 151, 181, 203 м³/с.

Средние за 10 лет значения s / σ_{Δ} представлены в табл. 7, из которой видно, что метод позволяет получить вполне удовлетворительные результаты прогнозов. Для всех рассматриваемых частных бассейнов средние оценки s / σ_{Δ} не превышают уровень эффективности 0,8. Анализируя погрешности прогнозов и его расчетного варианта, можно отметить следующее: для II и VII частных бассейнов точность прогнозов (с использованием экстраполяции значений метеозаэментов на период заблаговременности) несколько ниже по сравнению с расчетным вариантом; для I и III частных бассейнов при заблаговременности до

2 сут различие этих погрешностей, как правило, не очень значительное, более заметно превышение погрешностей прогнозов отмечается при заблаговременности 3-5 сут, а для IV и V частных бассейнов оценки s / σ_{Δ} примерно одинаковые как при расчетном, так и при прогнозном вариантах.

Таблица 7

Средние оценки точности проверочных прогнозов расходов воды для рассматриваемых районов Горьковского водохранилища

Номер частного бассейна	Средние величины S / σ_{Δ}									
	$\Delta=1$		$\Delta=2$		$\Delta=3$		$\Delta=4$		$\Delta=5$	
	расчет	прогноз	расчет	прогноз	расчет	прогноз	расчет	прогноз	расчет	прогноз
I	0,65	0,64	0,47	0,45	0,39	0,40	0,35	0,40	0,32	0,42
II	0,50	0,54	0,42	0,53	0,39	0,57	0,36	0,55	0,33	0,54
III	0,51	0,50	0,39	0,40	0,33	0,51	0,30	0,38	0,27	0,40
IV	0,68	0,67	0,52	0,45	0,46	0,40	0,40	0,40	0,37	0,37
V	0,47	0,46	0,38	0,37	0,34	0,34	0,31	0,32	0,29	0,32
VI	0,37	0,33	0,32	0,30	0,26	0,27	0,22	0,25	0,18	0,24
VII	0,46	0,49	0,37	0,49	0,32	0,49	0,30	0,50	0,28	0,49

Общий приток воды в Горьковское водохранилище

Прогноз всего бокового притока в водохранилище представляет собой сумму семи величин притока с каждого из частных бассейнов. При отработке схемы прогноза общего притока в водохранилище испытывалось несколько вариантов коррекции прогнозируемых значений притока воды.

Первый из них предусматривает составление прогнозов по сумме величин притока семи частных бассейнов с коррекцией расходов воды каждого частного бассейна. Коррекция общего притока при этом не проводилась.

Второй вариант помимо коррекции расходов воды каждого частного бассейна дополнительно предусматривает коррекцию общего притока.

В третьем варианте осуществлялась коррекция только общего притока без коррекции расходов воды частных бассейнов. Этот вариант коррекции использовался только в прогнозном режиме, т.е. при экстраполяции входных гидрометеорологических данных на период заблаговременности.

Четвертый вариант предусматривает коррекцию расходов воды по IV и VI частным бассейнам и коррекцию общего притока. Этот вариант расчета мы рассматриваем в связи с тем, что в оперативных условиях выпуска прогнозов притока воды представляется мало вероятным своевременное поступление всех фактических данных по малым рекам, необходимых для проведения коррекции величин притока всех семи частных бассейнов. Информация же по IV и VI частным бассейнам (водосборы достаточно крупных рек Костромы и Унжи) поступает регулярно.

Коррекция суммарного притока в отличие от коррекции расходов воды частных бассейнов производилась в предположении существования линейной зависимости ошибки прогноза величины общего притока $q_{t+\Delta}$ от известной в момент времени t ошибки δ_t аналогичного прогноза, выпущенного на Δ суток раньше:

$$\delta_{t+\Delta} = \alpha_{\Delta} \delta_t,$$

где t – момент выпуска прогноза притока,

Δ – заблаговременность прогноза (сутки),

α_{Δ} – параметр коррекции.

Значение α_{Δ} определялось методом наименьших квадратов по выражению:

$$\alpha_{\Delta} = \frac{\sum_{y=1}^Y \sum_{t=1}^{T_y-\Delta} \delta_{t,y} \times \delta_{t+\Delta,y}}{\sum_{y=1}^Y \sum_{t=1}^{T_y-\Delta} \delta_{t,y}^2},$$

где Y – количество лет расчетной выборки;

T_y – продолжительность расчетного периода в y -м году, $y = 1, 2, \dots, Y$.

Для периода весеннего половодья по архивным данным гидрометеорологических наблюдений за 10 лет были составлены проверочные прогнозы бокового притока к водохранилищу Горьковской ГЭС при различных вариантах коррекции прогнозируемых значений притока. Средние за 10 лет оценки прогнозов (s и s/σ_{Δ}) общего притока к водохранилищу, полученные в расчетном (при использовании фактических метеоданных) и прогнозном (при задании метеоданных на период заблаговременности с помощью ранее указанного метода) режимах, приведены в табл. 8. Для оценки эффективности использования коррекции суммарного притока были выполнены аналогичные расчеты без выполнения этой процедуры.

Таблица 8

Оценка точности расчетов и прогнозов притока воды в Горьковское водохранилище в период весеннего половодья при различных вариантах коррекции

Вариант коррекции	Заблаговременность (сут)									
	1		2		3		4		5	
	S, м ³ /с	S / σ_{Δ}	S, м ³ /с	S / σ_{Δ}	S, м ³ /с	S / σ_{Δ}	S, м ³ /с	S / σ_{Δ}	S, м ³ /с	S / σ_{Δ}
Коррекция расходов воды каждого частного бассейна.	189	0,65	281	0,50	338	0,42	383	0,37	414	0,33
		0,67		0,61		0,59		0,60		0,60
Коррекция расходов воды каждого частного бассейна и общего притока.	138	0,47	250	0,45	321	0,40	376	0,36	412	0,33
	152	0,52	322	0,58	466	0,58	612	0,59	741	0,59
Коррекция только общего притока.	169	0,58	348	0,62	498	0,62	623	0,60	735	0,59
Коррекция расходов воды IV и VI частных бассейнов и общего притока.	150	0,51	261	0,47	342	0,40	395	0,38	425	0,34
	169	0,58	354	0,64	505	0,63	636	0,61	753	0,60
Без коррекции расходов воды частных бассейнов и общего притока		1,68		0,91		0,70		0,63		0,60

Примечание. Приведены осредненные за 10 лет оценки прогнозов, полученные при использовании фактических гидрометеорологических данных на период заблаговременности прогнозов (числитель) и при задании гидрометеорологических данных с помощью экстраполяции (знаменатель).

Как следует из данных табл. 8, использование фактических расходов воды (VI район) и фактических метеоданных (I, II, III, IV, V и VII районы) на период заблаговременности при расчете общего притока позволяет получить хорошие оценки расчетов для всех вариантов коррекции. Однако предпочтение следует отдать второму варианту, когда корректируются расходы воды всех частных бассейнов и общий приток к водохранилищу.

Поскольку мы не располагали данными метеорологических прогнозов, оценки проверочных прогнозов общего притока были получены при экстраполяции метеорологических данных на период заблаговременности: температура и дефицит влажности воздуха принимались равными значениям, наблюдаемым в день выпуска прогноза, осадки – равными нулю. Из данных табл. 8 видно, что при экстраполяции на период заблаговременности входных гидрометеорологических данных практически во всех случаях ошибки прогнозов увеличиваются по сравнению с аналогичными ошибками, полученными при использовании фактических данных. Ошибки прогнозов возрастают с увеличением заблаговременности и для заблаговременности 4-5 сут превышают погрешности для расчетного варианта более чем в 1,5 раза. Это объясняется в основном приближенным заданием метеоэлементов на период заблаговременности и переход от формальной экстраполяции к использованию прогностических значений метеоэлементов может значительно улучшить качество прогнозов.

Оценки прогнозов, приведенные в табл. 8, показывают, что выпуск прогнозов без коррекции суммарного притока возможен только при условии учета коррекции по каждому частному бассейну. Поскольку при составлении прогнозов в оперативном режиме своевременное поступление всех фактических данных по малым рекам, необходимых для проведения коррекции величин притока всех семи частных районов, не гарантируется, коррекция суммарного притока становится необходимым условием получения приемлемого качества прогнозов.

Список литературы

1. Жидиков А.П. и др. Методы расчета и прогноза половодья для каскада водохранилищ и речных систем. – Л., Гидрометеиздат, 1977. - 128 с.
2. Бельчиков В.А., Корень В.И. Модель формирования талого и дождевого стока для лесных водосборов // Труды Гидрометцентра СССР. - 1979.- вып. 218. - С. 3-21.
3. Бельчиков В.А., Корень В.И. Опыт использования модели формирования талого и дождевого стока рек лесной зоны Европейской территории СССР // Труды Гидрометцентра СССР. – 1983. - вып. 246. - С. 3-20.
4. Корень В.И. Математические модели в прогнозах речного стока. Л.: Гидрометеиздат, 1991, - 199 с.
5. Корень В.И., Бельчиков В.А. Методические указания по использованию методов краткосрочных прогнозов ежедневных расходов (уровней) воды для речных систем на основе математических моделей. – Л.: Гидрометеиздат, 1989, - 176 с.
6. Наставление по службе прогнозов., раздел 3, часть 1 – Л.: Гидрометеиздат, 1962, - 193 с.