

**Методика и опыт прогнозных расчетов речного стока
(на примере бассейна р. Кундрючья)**

1. Основные положения методики

В основе задач планирования водно-энергетических режимов лежит прогноз стока, выдаваемый службами Росгидромета: элементов весенне-летнего половодья в начале водохозяйственного года, а для меженного периода - ожидаемых средних расходов (приведенных к естественным условиям) на ближайший период (месяц) или квартал.

Питание рек СевероКавказского региона происходит в большей степени водами, образующимися от таяния снега, а также в результате таяния ледников (для высокогорной зоны), грунтовыми и дождевыми.

Годовой сток характеризуется обычно высоким весенним-летним половодьем и низкой летнее-осенней и зимней меженью. Доля весеннего половодного стока составляет до 70% от годового. Летом также возможны значительные дождевые паводки, прогнозирование которых осуществляется отдельно на основе моделей сверхкраткорочного прогноза.

Апробация методики долгосрочного прогноза (на предстоящий водохозяйственный год) приводится на примере р.Кундрючья (бассейн р.Дон).

При исследовании возможности прогнозирования стока р. Кундрючья были использованы следующие материалы:

1. Ежедневные расходы воды по водпостам р. Кундрючья у ст. Владимировской (1952-2002) и у х. Мостовой (1952-1997);
2. Суммарный приток воды к Соколовскому водохранилищу (1968-2001 г.);
3. Запасы воды в снеге по маршрутным снегосъемкам по станциям (постам): Дарьевка, Владимировская, Б. Калитва, Шахты;
4. Глубину промерзания почвы по станциям: Б. Калитва, Шахты;
5. Запасы влаги в почве по Шахтам;
6. Температура воздуха и осадки по станциям: Каменск-Шахтинский, Шахты, Лихая.

Теоретической основой определения взаимной связи процессов поступления вод на поверхность бассейна, просачивания воды в почву, испарения и стока являются уравнения водного баланса. Для условий зоны Северного Кавказа общее уравнение водного баланса для периода снеготаяния сводится к виду:

$$Y = S + X - P, \quad (1)$$

где:

Y – поверхностный стока талых вод, мм;

S – максимальный запас воды в снежном покрове перед началом весеннего снеготаяния, мм;

X – весенние осадки, выпавшие после даты наступления максимального запаса воды в снеге до конца половодья;

P – общие потери талых вод на испарение, инфильтрацию в почву и поверхностное задержание.

Главными факторами потерь талых вод являются факторы, влияющие на инфильтрацию в почву, т.е. влажность и глубина промерзания почвы перед началом снеготаяния.

Влажность почвы перед началом снеготаяния в бассейне р. Кундрючья не измеряется, поэтому определялась косвенная характеристика весеннего увлажнения (U), учитывающая осеннюю влажность почвы (измеренную) и дальнейшее ее увеличение в оттепельные зимние периоды.

В процессе разработки методики были исследованы различные варианты связей гидрологических элементов, в частности:

$$Y = f(U, S_{\text{общ.}}, L) \quad (2)$$

$$Y = f(S_{\text{общ.}}, L) \quad (3)$$

$$Y = f(S_{\text{общ.}}, U) \quad (4)$$

$$Y = f(S_{\text{общ.}}) \quad (5)$$

и другие, где

$S_{\text{общ.}} = S + X$, - слой стока на бассейне на период от даты наступления максимальных снегозапасов до конца половодья, получаемый как сумма фактического значения максимальных снегозапасов и прогнозируемого количества осадков до конца половодья, с учетом потерь;

U – характеристика весеннего увлажнения, учитывающая осеннюю влажность почвы (измеренную) и дальнейшее ее увеличение в оттепельные зимние периоды;

L – глубина промерзания почвы.

Лучший результат показала зависимость $Y = f(S_{\text{общ.}}, L)$, для лет промерзания почвы менее 60 см, описанная следующим уравнением:

$$Y = 0,127 S_{\text{общ.}} + 0,175L + 5,717 \quad (6)$$

Коэффициент корреляции данного уравнения равен 0,7; средняя квадратическая ошибка зависимости 7,94, среднее квадратическое отклонение слоя стока 11,1, коэффициент детерминации уравнения равен 0,749 или 74,9%, что говорит о том, что доля учтенных факторов составляет существенное значение по сравнению с неучтенными факторами прогноза.

Критерий качества методики:

$$\frac{S}{\sigma} = 0,7, \quad (7)$$

где:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y - Y_1)^2}{n - m}}, \quad (8)$$

Y – фактическая величина слоя стока по наблюдаемому многолетнему ряду,

Y_1 – прогноз,

n – количество членов ряда,

m – число степеней свободы (принимается равным 2),

σ – среднеквадратическое отклонение слоя стока.

Допустимая ошибка прогноза равна

$$\delta_{\text{доп}} = 0,674\sigma = 7,49 \text{ мм} \quad (9)$$

Значение критерия качества методики (7) меньше, либо равное 0,8 характеризует методику как удовлетворительную, а меньшее, либо равное 0,4 как хорошую.

Приведенные показатели рассчитаны в соответствии с «Наставлением по службе прогнозов. Раздел 3, часть 1. Гидрометеиздат, Л, 1962» и характеризует категорию качества методики как удовлетворительную.

Разработка метода прогноза стока выполнялась для створа у с. Владимировской и далее по перекидным связям, коэффициент корреляции которых 0,83-0,89, определяется прогнозируемый сток в остальных расчетных створах.

Слой стока в створе у х. Мостовой определяется в соответствии с уравнением:

$$Y_M = 0,889Y_B + 4,675, \quad (10)$$

где:

Y_M – слой стока у х. Мостовой, мм,

Y_B – слой стока у с. Владимировская, мм.

Коэффициент корреляции связи 0,89, $\delta_{\text{доп}} = 0,674\sigma = 11,8$ мм, значение критерия качества модели $\frac{S}{\sigma} = 0,46$, что характеризует методику прогноза как близкую к хорошей.

Слой стока во входном створе Соколовского водохранилища (створ №2) определяется в соответствии с уравнением:

$$Y_C = 0,797Y_B + 11,515, \quad (11)$$

где:

Y_C – слой стока для входного створа Соколовского водохранилища, мм,

Y_B – слой стока у с. Владимировская, мм.

Коэффициент корреляции связи 0,83, $\delta_{\text{доп}} = 0,674\sigma = 11,1$ мм, значение критерия качества модели $\frac{S}{\sigma} = 0,56$, что характеризует методику прогноза как удовлетворительную.

2. Алгоритм расчета речного стока в створах р. Кундрючья в период половодья на основе прогнозных данных

Форма выдачи прогноза стока на период половодья для указанных створов иллюстрируется нижеприведенной таблицей на примере прогноза СК ГМЦ для весеннего половодья в 2004 г.

Таблица 1

Консультативный прогноз слоев стока и максимальных расходов весеннего половодья р.
Кундрючья в 2004 г.

Наименование створа	Слой стока, мм	Максимальный расход, $Q_{\text{макс}}, \text{м}^3/\text{сек}$
створ №2	18-22	4-6
створ № 12	10-12	12-14
створы № 13,14	12-14	20-25

Кроме приведенных в таблице данных в число прогнозируемых элементов половодного стока входят сроки начала и окончания половодья, ожидаемая дата

прохождения максимального расхода, а также расходы меженного стока в створах на дату, непосредственно предшествующую началу половодья.

Форма выдачи прогноза стока на период межени предусматривает получение прогнозируемых значений среднемесячных расходов для каждого последующего месяца в течение оставшегося периода года для тех же приведенных створов №№ 2, 12-14.

Расчетными створами в задаче пропуска половодного стока и управления в период межени, кроме приведенных выше №№ 2, 12-14, являются следующие промежуточные створы (см. табл.2)

Таблица 2

Перечень створов р.Кундрючья для управления водными ресурсами

№ п/п	Река	Наименование створа	Площадь водосбора, км ²
1.	Кундрючья	Граница Украины и России	135
2.	Кундрючья	Выше Соколовского водохранилища	252
3.	Кундрючья	Плотина Соколовского водохранилища	430
4.	Кундрючья	Плотина Вербенского водохранилища	497
5.	Кундрючья	Выше устья р.Б.Гнилуша	553
10.	Б.Гнилуша	Устье	267
11	Кундрючья	Плотина Прохоровского водохранилища	941
12.	Кундрючья	Граница Красносулинского и Белокалитвенского районов	1510
13.	Кундрючья	Граница Белокалитвенского и Усть-Донецкого района	1965
14.	Кундрючья	Устье р.Кундрючья	2320

Примечание: **жирным шрифтом** выделены створы для которых дается прогноз СК УГМС

Для промежуточных створов расчет параметров слоя стока, максимального расхода, а также меженных расходов выполняется по интерполяционным формулам (табл.3):

Формулы для пересчета прогнозных данных в расчетные створы

№ створа	Площадь водосбора, км ²	Формула для расчета слоя стока в створе, h, мм	Формула для расчета максимального расхода Q _{макс} , м ³ /сек	Формула для расчета объема стока за период половодья, V, млн. м ³	Формула для расчета расходов меженного стока (в том числе предшествующего дате начала половодья), Q _М
1.	135	$h_1 = h_2$	$Q_1 = 0.536 \cdot Q_2$	$V_1 = h_1 \cdot 0.135$	$Q_{М,1} = 0.536 \cdot Q_2$, либо $Q_{М,1} = Q_{Влад} \cdot 0,121$
2.	252	h_2 – задано по прогнозу	Q_2 – задано по прогнозу	$V_2 = h_2 \cdot 0.252$	$Q_{М,2}$ – задано по прогнозу, либо $Q_{М,2} = Q_{Влад} \cdot 0,225$
3.	430	$h_3 = (h_2 \cdot 1080 + h_{12} \cdot 178) / 1258$	$Q_3 = (Q_2 \cdot 1080 + Q_{12} \cdot 178) / 1258$	$V_3 = h_3 \cdot 0.43$	$Q_{М,3} = (Q_2 \cdot 1080 + Q_{12} \cdot 178) / 1258$, либо $Q_{М,3} = Q_{Влад} \cdot 0,384$
4.	497	$h_4 = (h_2 \cdot 1013 + h_{12} \cdot 245) / 1258$	$Q_4 = (Q_2 \cdot 1013 + Q_{12} \cdot 245) / 1258$	$V_4 = h_4 \cdot 0.497$	$Q_{М,4} = (Q_2 \cdot 1013 + Q_{12} \cdot 245) / 1258$, либо $Q_{М,4} = Q_{Влад} \cdot 0,444$
5.	553	$h_5 = (h_2 \cdot 957 + h_{12} \cdot 301) / 1258$	$Q_5 = (Q_2 \cdot 957 + Q_{12} \cdot 301) / 1258$	$V_5 = h_5 \cdot 0.553$	$Q_{М,5} = (Q_2 \cdot 957 + Q_{12} \cdot 301) / 1258$, либо $Q_{М,5} = Q_{Влад} \cdot 0,494$
10.	267	$h_{10} = (h_{12} \cdot 1510 - h_2 \cdot 252) / 1258$	$Q_{10} = (Q_{12} - Q_2) \cdot 267 / 1258$	$V_{10} = h_{10} \cdot 0.267$	$Q_{М,10} = (Q_{12} - Q_2) \cdot 267 / 1258$, либо $Q_{М,10} = Q_{Влад} \cdot 0,238$
11	941	$h_{11} = (h_2 \cdot 569 + h_{12} \cdot 689) / 1258$	$Q_{11} = (Q_2 \cdot 569 + Q_{12} \cdot 689) / 1258$	$V_{11} = h_{11} \cdot 0.941$	$Q_{М,11} = (Q_2 \cdot 569 + Q_{12} \cdot 689) / 1258$, либо $Q_{М,11} = Q_{Влад} \cdot 0,84$
12.	1510	h_{12} - задано по прогнозу	Q_{12} – задано по прогнозу	$V_{12} = h_{12} \cdot 1.51$	$Q_{М,12}$ – задано по прогнозу, либо $Q_{М,12} = Q_{Влад} \cdot 1,348$
13.	1965	h_{13} - задано по прогнозу	Q_{13} – задано по прогнозу	$V_{13} = h_{13} \cdot 1.965$	$Q_{М,13}$ – задано по прогнозу, либо $Q_{М,13} = Q_{Влад} \cdot 1,754$
14.	2320	h_{14} - задано по прогнозу	Q_{14} – задано по прогнозу	$V_{14} = h_{14} \cdot 2.32$	$Q_{М,14}$ – задано по прогнозу, либо $Q_{М,14} = Q_{Влад} \cdot 2,071$

Примечание: Q_{Влад} – наблюдаемые расходы стока на гидрологическом посту р. Кундрючья-с. Владимировская.

На основе прогноза основных элементов весеннего половодья (данных предыдущей таблицы) осуществляется моделирование гидрографов приточности к расчетным створам с посуточной разбивкой. В связи с отсутствием надежной базы данных типовых гидрографов стока, вследствие ограниченного периода наблюдений за режимом половодного стока р. Кундрючья, в основу разработки алгоритма моделирования суточных гидрографов половодного стока положен метод С.Н. Крицкого и М.Ф. Менкеля (Водохозяйственные расчеты, 1952) по известному биномиальному уравнению с учетом выполненной доработки на основе опыта моделирования половодного стока малых рек:

$$Q_t = Q_{\max} \left(\frac{t}{T_n} e^{1 - \frac{t}{T_n}} \right)^{n(t)} \quad (12)$$

Q_t - текущее значение расхода воды;

Q_{\max} - максимальный расход воды;

T_n - продолжительность периода подъема воды;

$n(t)$ – параметр адаптации модели, характеризующий форму гидрографа волны и устанавливающий соотношение между объемом волны V и максимальным расходом Q_{\max} .

Параметр $n(t)$ в уравнении (12) задается дифференцированно для участков подъема и спада кривой половодной волны, учитывая ее несимметричность, неравномерность роста или спада волны, иногда двухвершинный характер кривой с учетом индивидуальных особенностей метеорологических условий конкретного года. Для типичной кривой половодной волны с явно выраженным пиком и более продолжительным периодом спада волны по сравнению с ее подъемом и когда нет дополнительной информации о характере развития половодной волны, этот параметр принимается постоянной (средней) величиной для всей кривой гидрографа.

Среднее значение параметра n - вычисляется из следующего уравнения:

$$\frac{V}{Q_{\max} T_n} = \frac{e^n \Gamma(n+1)}{n^{n+1}} \quad (13)$$

где $\Gamma(n+1)$ - гамма функция (интеграл Эйлера второго рода);

T_n – период продолжительности подъема воды половодья (для симметричной кривой гидрографа $T = 2T_n$, для несимметричной $T \geq 2T_n$, где T – общая продолжительность половодья).

Полный гидрограф половодья получается в результате суммирования расчетного гидрографа половодной волны с межнным стоком (базисным стоком) Q_M . Таким образом, используемые в уравнении (12) и формуле (13) параметры для расчетов V , Q_{\max} следует брать следующими:

$$\begin{aligned} V &= V_{\text{прогн}} - Q_M T \\ Q_{\max} &= Q_{\max}^{\text{прогн}} - Q_M \end{aligned} \quad (14)$$

где $V_{\text{прогн}}$, $Q_{\max}^{\text{прогн}}$ – объем стока и максимальный (среднесуточный) расход половодья по прогнозу СК УГМС;

Фактический гидрограф равен:

$$\bar{Q}_t = Q_t + Q_M, \quad (15)$$

где Q_t рассчитано по уравнению (12).

Адаптация модели (12)-(15) для р. Кундрючья должна быть выполнена в процессе эксплуатации системы управления.

По желанию пользователя полученный гидрограф может быть откорректирован вручную в блоке корректировки исходных данных.

3. Расчет речного стока в створах р. Кундрючья на период межени и текущего года

Проведенный анализ статистической взаимосвязи внутригодовой динамики расходов стока р. Кундрючья показал наличие достаточно высокой тесноты связи стока соседних периодов в течение всей летней и осенне-зимней межени (см. табл.3-6), что позволяет строить прогнозный гидрограф стока в предстоящем периоде используя метод последовательного определения линейной авторегрессии.

Для построения расчетного гидрографа стока на предстоящий водохозяйственный год возможно использование регрессионных моделей, связывающих параметры стока за несколько соседних месяцев при оптимальной глубине связности для рассматриваемого бассейна три месяца. Более длительная связь, как правило, не прослеживается, либо выражена весьма слабо. Кроме того, отмечается весьма слабая связь весенних месяцев (февраль, март, апрель) с остальными периодами года (коэффициенты корреляции смежных месяцев, а также весеннего стока с объемом стока за период межени в целом, близки к нулю), что говорит о необходимости использования прогноза СК УГМС для этих месяцев для установления весенней составляющей годового гидрографа.

Устойчивая связь расходов смежных периодов начинает прослеживаться с июня и для последующих месяцев водохозяйственного года, что позволяет по переходным уравнениям рассчитывать гидрограф для межени составляющей годового гидрографа.

Таким образом, предлагается использовать комбинированный прогноз при расчете годового гидрографа стока, с учетом, как обязательного элемента прогнозных показателей СК УГМС на основе гидрометеофакторов текущего года, со статистическими расчетами на основе имеющихся корреляционных межинтервальных связей.

Для расчета годового гидрографа стока используется прогноз или фактическое значение объема половодья, а также оперативные данные о межени расходах стока.

Построение расчетного гидрографа на планируемый период: год, оставшуюся часть года или текущий месяц осуществляется с использованием данных о предстоящем стоке по оперативному прогнозу стока СК УГМС на ближайший период (как правило - месяц) и данных о фактических расходах за предшествующие месяцы. На последующий период расчет осуществляется ежемесячно с использованием авторегрессионных моделей.

В начале водохозяйственного года по данным прогноза половодья и консультаций со специалистами СКУГМС, рассчитываются расходы стока в весенний период с использованием предложенной адаптивной модели гидрографа по биномиальному уравнению, оцениваются расходы за период февраль-май, и далее по переходным уравнениям – гидрограф на оставшуюся часть года. В дальнейшем построенный гидрограф может уточняться в соответствии с фактическим развитием гидрологической ситуации в бассейне по методу скользящей коррекции.

Таблица 3

Корреляционная матрица месячных расходов воды р. Кундрючья, створ Соколовского водохранилища

Месяцы	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	1	0.157	-0.062	0.267	0.042	-0.024	0.070	0.098	0.107	0.189	0.231	0.170
2	-0.003	1	0.085	-0.138	0.101	0.143	0.205	0.132	0.150	0.185	0.219	0.118
3	-0.104	-0.083	1	0.059	-0.058	-0.005	-0.039	-0.026	-0.051	-0.108	-0.108	-0.116
4	-0.219	-0.028	0.188	1	0.341	0.123	0.122	0.079	0.061	0.135	0.086	-0.057
5	-0.021	-0.078	0.036	-0.187	1	0.780	0.685	0.627	0.684	0.764	0.680	0.358
6	0.048	-0.082	0.048	-0.117	0.041	1	0.665	0.541	0.661	0.655	0.591	0.324
7	0.107	0.037	0.019	-0.161	0.051	0.048	1	0.873	0.749	0.742	0.732	0.394
8	0.108	0.007	-0.134	-0.140	0.085	0.106	0.208	1	0.720	0.753	0.694	0.408
9	0.078	0.033	-0.060	-0.252	0.054	0.116	0.340	0.252	1	0.855	0.731	0.418
10	0.079	0.060	-0.021	-0.262	0.178	0.240	0.410	0.387	0.478	1	0.873	0.591
11	0.145	0.063	0.125	-0.201	0.170	0.220	0.400	0.409	0.377	0.418	1	0.741
12	0.489	0.169	0.108	0.108	0.224	0.230	0.494	0.546	0.410	0.505	0.570	1

Таблица 4

Корреляционная матрица месячных расходов воды р. Кундрючья, ст. Владимировская

Месяцы	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	1	0.153	-0.008	0.726	0.173	0.039	0.078	0.088	0.195	0.193	0.279	0.106
2	0.022	1	0.156	0.004	0.102	0.273	0.292	0.120	0.182	0.195	0.195	0.068
3	-0.254	-0.154	1	0.066	0.047	-0.050	-0.021	0.007	0.049	-0.017	-0.051	-0.121
4	-0.187	-0.092	0.138	1	0.169	0.184	0.203	0.168	0.206	0.216	0.232	0.095
5	0.097	0.019	0.076	0.067	1	0.577	0.512	0.566	0.676	0.651	0.658	0.496
6	0.176	0.040	0.131	-0.023	0.368	1	0.821	0.643	0.769	0.796	0.743	0.599
7	0.187	0.170	0.153	-0.064	0.308	0.247	1	0.812	0.738	0.737	0.710	0.586
8	0.201	0.081	0.167	-0.019	0.360	0.334	0.296	1	0.840	0.821	0.791	0.667
9	0.149	0.082	0.226	-0.072	0.467	0.419	0.374	0.466	1	0.925	0.870	0.676
10	0.175	0.117	0.237	-0.016	0.478	0.479	0.410	0.508	0.653	1	0.864	0.734
11	0.204	0.145	0.146	0.010	0.492	0.518	0.519	0.649	0.743	0.726	1	0.785
12	0.355	0.196	0.200	0.261	0.412	0.505	0.586	0.621	0.610	0.567	0.658	1

Таблица 5

Корреляционная матрица месячных расходов воды р. Кундрючья, х. Мостовой

Месяцы	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	1	0.146	0.115	0.611	0.024	-0.110	0.008	0.042	0.126	0.081	0.092	0.027
2	-0.030	1	0.236	-0.008	0.122	0.314	0.121	0.087	0.177	0.187	0.195	0.160
3	-0.143	-0.068	1	0.141	0.076	-0.051	-0.026	0.081	0.224	0.114	0.049	0.048
4	-0.193	-0.124	0.095	1	0.333	0.157	0.072	0.165	0.205	0.201	0.190	0.095
5	0.021	-0.030	0.174	-0.094	1	0.569	0.617	0.778	0.858	0.852	0.850	0.705
6	0.016	-0.021	0.035	-0.082	0.175	1	0.558	0.458	0.495	0.488	0.472	0.446
7	0.070	0.165	0.076	-0.052	0.204	-0.012	1	0.796	0.730	0.697	0.751	0.640
8	0.123	0.002	0.148	0.012	0.158	-0.082	0.188	1	0.890	0.864	0.845	0.703
9	0.041	0.035	0.184	-0.092	0.283	-0.036	0.324	0.398	1	0.950	0.915	0.778
10	0.030	0.066	0.220	-0.056	0.373	0.018	0.377	0.466	0.525	1	0.948	0.805
11	0.098	0.074	0.201	-0.013	0.426	0.049	0.479	0.577	0.627	0.609	1	0.850
12	0.176	0.256	0.260	0.125	0.442	0.199	0.515	0.550	0.587	0.585	0.583	1

Таблица 6

Коэффициенты множественной корреляции месячных расходов при глубине связности три месяца

Створы р. Кундрючья	МЕСЯЦЫ											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Соколовское вдхр.	0.586	0.189	0.114	0.155	0.350	0.795	0.716	0.875	0.761	0.878	0.873	0.750
ст. Владимировская	0.375	0.215	0.159	0.067	0.173	0.584	0.822	0.813	0.845	0.928	0.884	0.793
х. Мостовой	0.202	0.275	0.250	0.148	0.334	0.570	0.667	0.796	0.891	0.951	0.949	0.850

Учитывая то, что прогнозные расчеты носят приближенный характер, расчетные гидрографы строятся в диапазоне допустимой ошибки прогноза в виде усредненного прогнозного гидрографа, а также нижней и верхней его огибающих, представляющих собой как бы диапазон (границы) реализации фактического гидрографа в текущем водохозяйственном году.

$$\begin{aligned} Q_t &= Q(Q_{t-1}, Q_{t-2}) \\ Q_t^- &= Q_t - \delta_t \\ Q_t^+ &= Q_t + \delta_t \end{aligned} \quad (16)$$

где, Q_t - расход для расчетного месяца;

Q_{t-1} и Q_{t-2} - известные или прогнозные значения расходов предыдущих периодов;

Q_t^- и Q_t^+ - соответственно нижняя и верхняя огибающие прогнозного гидрографа;

δ_t - допустимая ошибка прогноза в каждом месяце, рассчитываемая по рекомендациям Наставлений по службе прогнозов (Раздел 3, часть 1. Гидрометеиздат, Л, 1962).

При планировании распределения водных ресурсов на основе такого подхода, возможно, представить, как бы общий прогноз водности и план распределения водных ресурсов, а также оптимистичный и пессимистичный варианты развития водохозяйственной обстановки.

Форма выдачи прогноза стока на период межени предусматривает получение прогнозируемых значений среднемесячных расходов для створов №№ 2, 12, 13, 14 на предстоящий месяц, для всех месяцев меженного периода. Для указанных створов осуществляется построение прогнозных гидрографов по представленной методике, а затем на их основе расчет гидрографов стока для остальных створов бассейна по интерполяционным формулам, приведенным в табл.2.

Уравнение авторегрессионной зависимости для вычисления расходов в перечисленных створах имеет вид:

$$Q_t^i = a_t^i + b_t^i \cdot Q_{t-1}^i + c_t^i \cdot Q_{t-2}^i \quad (17)$$

где:

Q_t^i - расход для расчетного месяца t и створа i ;

Q_{t-1}^i и Q_{t-2}^i - известные или прогнозные значения расходов предыдущих периодов ($t-1$) и ($t-2$) для того же створа i ;

a_t^i, b_t^i, c_t^i - коэффициенты авторегрессии, определяемые методом наименьших квадратов по многолетним восстановленным рядам стока в расчетных створах.

Расчетные значения коэффициентов регрессии для вычислений по уравнениям (17) представлены в табл.7.

В табл.8 дается сравнительный анализ ретроспективных прогнозных расчетов для календарного ряда для возможности сравнения качества прогноза в годовых объемах.

Проведенные расчеты, выполненные для трех опорных створов бассейна для восстановленных рядов стока р. Кундрючей для створа Соколовского водохранилища за период 1929-1989 гг, створа ст. Владимировская 1952-2003 гг. и створа х. Мостовой 1953-1997 гг. показали достаточно хорошее совпадение прогнозных и фактических величин для большинства лет, за исключение некоторых нехарактерных лет, таких как 1940, 1972, 1973 и 1975 гг. Однако несмотря на эти несовпадения, которые очевидно могут быть скорректированы с учетом оперативного прогноза СК УГМС, коэффициенты корреляции прогнозных объемов с фактически наблюдаемыми значениями составляют, для створа Соколовского водохранилища – 0.707, а для Владимировской и Мостового -0.87-0.89. Проверка критерия качества модели по критерию S/σ (см. табл.9) показала удовлетворительное качество модели, для всех створов, а для створов Владимировская и Мостовой близкое к хорошему.

Представленные в табл.9 обобщенные показатели качества прогноза свидетельствуют об удовлетворительном или хорошем качестве статистического прогноза в зависимости от месяца года. Наиболее высокое качество для 6-11 месяцев, невысокое качество прогноза и существенные ошибки отмечаются для весенних месяцев (февраль-март), однако этот недостаток существенно устраняется при учете оперативного прогноза стока при известных гидрометеофакторах текущего года по прогнозу СКУГМС.

Точность прогноза для одной и той же зоны существенно зависит от площади водосбора: чем больше площадь водосбора, тем выше точность.

Аналогичные расчеты, выполненные для р.Северский Донец (граница Украины и Ростовской области) и р.Дон (в створе Цимлянского водохранилища), выполненные в режиме пошаговой коррекции дают коэффициент корреляции 0,960 - 0,983.

Таблица 7

Коэффициенты авторегрессии для уравнений прогноза стока $Q_t^i = a_t^i + b_t^i \cdot Q_{t-1}^i + c_t^i \cdot Q_{t-2}^i$

Наименование створа	Коэф.	Номер календарного месяца											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
р. Кундрючья, плотина Соколовского водохранилища	a	0.3922	0.8895	2.6355	2.0670	0.5740	0.0501	0.1700	-0.0031	-0.0125	0.0025	0.0890	0.3403
	b	1.8751	0.2832	0.1163	0.0798	0.0789	0.6921	0.2694	0.7966	0.2410	0.5375	1.2695	1.2240
	c	-1.3824	0.4204	-0.1872	-0.1933	-0.0200	-0.0306	0.2843	-0.0498	0.3753	0.2016	-0.0665	-0.4180
р. Кундрючья, ст. Владимировская	a	1.4905	3.3854	6.2782	4.4409	2.1751	0.9976	0.1673	0.0272	0.5385	0.2888	0.6625	0.8519
	b	1.2903	0.2496	0.1478	0.0529	0.0929	0.4313	0.6671	0.7662	0.5425	0.9018	0.4707	0.6051
	c	-0.5037	0.2266	-0.0514	-0.0044	0.0158	0.0379	0.0368	-0.0544	0.1095	0.1303	0.6484	0.2564
р. Кундрючья, х. Мостовой	a	3.7807	4.3023	10.6688	7.7698	2.8846	0.4836	1.6486	0.0309	0.6178	0.4810	0.4835	0.7858
	b	0.9725	0.2291	0.2029	0.1272	0.1207	0.7710	0.1869	0.6879	0.6147	0.9191	0.9600	1.0255
	c	-0.6499	0.7316	0.1204	-0.0331	0.0091	-0.0179	0.3598	0.0108	0.0371	0.0671	0.1735	-0.0131
р. Кундрючья, гр. Красносулинского и Белокалитвенского р-нов, створ12	a	2.0094	4.5642	8.4624	5.9870	2.9333	1.3459	0.2278	0.0258	0.7572	0.4263	1.0829	1.2312
	b	1.2903	0.2496	0.1478	0.0529	0.0929	0.4313	0.6671	0.7662	0.5425	0.9018	0.4707	0.6051
	c	-0.5037	0.2266	-0.0514	-0.0044	0.0158	0.0379	0.0368	-0.0544	0.1095	0.1303	0.6484	0.2564
р. Кундрючья, гр. Белокалитвенского и Усть-Донецкого р-ов, створ 13	a	3.4554	3.9321	9.7505	7.1016	2.6362	0.4422	1.4965	0.0277	0.5628	0.4350	0.4287	0.7192
	b	0.9725	0.2291	0.2029	0.1272	0.1207	0.7710	0.1869	0.6879	0.6147	0.9191	0.9600	1.0255
	c	-0.6499	0.7316	0.1204	-0.0331	0.0091	-0.0179	0.3598	0.0108	0.0371	0.0671	0.1735	-0.0131
р. Кундрючья, устье, створ 14	a	4.0796	4.6425	11.5126	8.3837	3.1129	0.5216	1.7885	0.0338	0.6683	0.5232	0.5340	0.8469
	b	0.9725	0.2291	0.2029	0.1272	0.1207	0.7710	0.1869	0.6879	0.6147	0.9191	0.9600	1.0255
	c	-0.6499	0.7316	0.1204	-0.0331	0.0091	-0.0179	0.3598	0.0108	0.0371	0.0671	0.1735	-0.0131

Таблица 8

Сравнение результатов прогнозного и фактического объема стока для годовых величин с использованием авторегрессионных моделей

р. Кундрючья								
Соколовское водохранилище			ст. Владимировская			х. Мостовой		
Номер года	Годовой. объем (прогноз), млн.м ³	Годовой. объем (факт.), млн.м ³	Номер года	Годовой. объем (прогноз), млн.м ³	Годовой. объем (факт.), млн.м ³	Номер года	Годовой. объем (прогноз), млн.м ³	Годовой. объем (факт.), млн.м ³
1929	40.83	54.66	1952	68.5	57.1	1953	128.5	163.2
30	28.54	23.74	53	70.0	83.3	54	108.9	45.5
31	25.76	32.63	54	62.6	22.1	55	105.5	131.3
32	24.68	31.59	55	61.5	68.7	56	160.8	153.2
33	28.83	29.73	56	89.4	88.1	57	106.1	58.7
34	24.04	16.74	57	63.5	35.4	58	180.9	255.3
35	23.17	17.70	58	106.9	131.1	59	143.7	107.6
36	22.87	15.71	59	80.1	58.5	1960	123.3	78.9
37	22.79	21.91	1960	78.2	50.4	61	120.7	58.6
38	22.84	21.93	61	73.1	36.2	62	121.9	78.0
39	22.89	21.70	62	73.9	47.2	63	149.1	200.6
1940	32.82	70.28	63	83.2	88.5	64	151.0	131.6
41	28.92	50.16	64	88.1	85.6	65	118.2	93.2
42	24.46	36.08	65	70.8	43.6	66	156.3	129.2
43	24.79	19.61	66	90.8	73.5	67	149.1	159.8
44	26.75	15.82	67	89.0	88.1	68	192.3	228.5
45	25.80	25.88	68	104.3	116.7	69	144.1	114.7
46	26.01	34.09	69	89.7	71.3	1970	166.4	234.8
47	24.55	41.31	1970	96.8	146.3	71	137.6	91.0
48	23.45	17.76	71	81.2	51.2	72	124.3	49.7
49	24.40	15.00	72	73.4	29.1	73	121.3	60.0
1950	25.31	15.85	73	76.9	39.8	74	139.4	100.8
51	21.96	28.08	74	83.2	67.2	75	117.7	53.3
52	23.09	23.26	75	72.3	30.8	76	134.8	110.2
53	23.25	34.36	76	79.0	53.0	77	188.2	230.4
54	22.30	14.56	77	118.4	143.2	78	182.8	224.1
55	23.53	32.68	78	101.4	115.8	79	208.3	321.3
56	29.96	36.34	79	98.7	153.0	1980	200.4	235.0
57	23.62	17.71	1980	102.5	111.5	81	242.6	295.9
58	32.11	53.78	81	109.1	144.0	82	297.4	327.3
59	30.42	24.08	82	146.2	159.8	83	195.4	183.1
1960	25.38	19.13	83	92.5	78.3	84	154.4	121.3
61	24.70	15.45	84	73.2	55.2	85	180.3	251.7
62	24.71	18.05	85	95.6	127.5	86	131.4	103.6

р. Кундрючья								
Соколовское водохранилище			ст. Владимировская			х. Мостовой		
Номер года	Годовой. объем (прогноз), млн.м ³	Годовой. объем (факт.), млн.м ³	Номер года	Годовой. объем (прогноз), млн.м ³	Годовой. объем (факт.), млн.м ³	Номер года	Годовой. объем (прогноз), млн.м ³	Годовой. объем (факт.), млн.м ³
1963	26.71	29.82	86	97.8	102.5	87	219.9	234.2
64	29.01	31.24	87	130.8	142.9	88	162.3	173.9
65	25.09	20.74	88	99.9	112.6	89	178.1	173.0
66	31.73	29.38	89	119.6	124.1	1990	166.4	141.3
67	32.40	36.24	1990	108.0	102.2	91	152.3	115.6
68	34.97	46.75	91	102.7	91.2	92	167.2	157.0
69	27.10	17.96	92	115.3	115.6	93	169.8	165.0
1970	26.13	40.97	93	120.5	137.1	94	157.0	183.5
71	25.88	14.89	94	104.9	127.3	95	159.1	144.3
72	22.29	5.53	95	102.5	111.6	96	179.7	172.7
73	23.62	9.69	96	119.7	116.9	97	232.1	229.3
74	26.94	18.77	97	146.1	170.8			
75	21.55	5.62	98	125.9	149.4			
76	26.85	21.45	99	117.7	127.9			
77	35.91	43.23	2000	123.6	148.8			
78	28.39	27.85	1	105.5	98.8			
79	25.64	48.02	2	110.3	118.6			
1980	35.20	38.98	3	111.2	125.5			
81	37.17	44.10						
82	48.81	52.90						
83	27.29	16.52						
84	22.12	8.89						
85	27.02	34.89						
86	24.71	18.21						
87	46.15	53.98						
88	34.91	37.42						
89	35.06	37.12						
Коэффициенты корреляции прогнозных и фактических объемов годового стока								
г	0.707		г	0.891		г	0.869	

Таблица 9

Показатели качества прогноза по ретроспективным сравнительным расчетам

Показатели	Значения показателей для отдельных месяцев												Значения показателя для год. объема
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
р. Кундрючья, Соколовское водохранилище													
Коэфф. корреляции фактических и прогнозных расходов, r	0.587	0.182	0.115	0.160	0.426	0.792	0.712	0.874	0.758	0.876	0.870	0.744	0.707
Ср. квадратическое значение ошибки прогноза, S	0.523	1.624	2.125	2.120	0.455	0.221	0.260	0.152	0.198	0.166	0.165	0.350	9.593
Значение критерия качества прогноза, S/σ	0.529	0.816	0.887	0.794	0.746	0.437	0.636	0.430	0.651	0.663	0.479	0.784	0.701
Допустимая ошибка прогноза, δ	0.667	1.341	1.614	1.801	0.411	0.341	0.275	0.238	0.205	0.169	0.233	0.301	9.226
р. Кундрючья, ст. Владимировская													
Коэфф. корреляции фактических и прогнозных расходов, r	0.378	0.213	0.190	0.090	0.176	0.576	0.818	0.811	0.843	0.927	0.880	0.786	0.891
Ср. квадратическое значение ошибки прогноза, S	1.927	4.255	4.301	2.738	1.774	1.166	0.660	0.600	0.456	0.384	0.632	0.745	21.87
Значение критерия качества прогноза, S/σ	0.579	0.756	0.831	0.674	0.784	0.672	0.449	0.465	0.462	0.344	0.488	0.568	0.550
Допустимая ошибка прогноза, δ	2.245	3.794	3.490	2.738	1.525	1.169	0.990	0.869	0.666	0.753	0.873	0.884	26.81
Р. Кундрючья, х. Мостовой													
Коэфф. корреляции фактических и прогнозных расходов, r	0.202	0.261	0.262	0.141	0.346	0.565	0.665	0.795	0.891	0.951	0.948	0.848	0.869
Ср. квадратическое значение ошибки прогноза, S	3.562	7.296	7.993	5.661	2.335	2.527	2.010	1.048	0.650	0.395	0.551	1.071	41.2
Значение критерия качества прогноза, S/σ	0.547	0.693	0.838	0.707	0.796	0.649	0.844	0.502	0.427	0.247	0.292	0.475	0.587
Допустимая ошибка прогноза, δ	4.390	7.099	6.429	5.394	1.978	2.626	1.605	1.407	1.025	1.080	1.272	1.518	47.3