

Автоматизированный метод краткосрочного прогноза расходов (уровней) воды в бассейне р. Усури, на основе адаптации типового метода прогноза гидрографа дождевых паводков дальневосточных рек. (Гарцман Б.И.)

1. Структура и алгоритмы модели паводочного цикла

Предпосылки и основные этапы разработки модели паводочного цикла малого речного бассейна (ПЦ-модели МРБ) рассмотрены в ряде публикаций [1-6]. Концепция модели включает следующие предположения:

существует критический расход $Q_{кр}$, фиксирующий переполнение бассейновой ёмкости;

существуют характерные значения влагозапасов составляющих бассейновой ёмкости, отвечающие их наполнению;

свободная динамика всех стокообразующих элементов бассейна описывается степенными зависимостями расхода от объёма влагозапаса;

расход в замыкающем створе функционально связан с величиной гравитационной составляющей бассейнового влагозапаса;

при расходе $Q_{кр}$ приток в русловую ёмкость равен расходу из неё, также равны и их производные.

Первым этапом стокообразования является разделение выпадающих осадков между гравитационной и негравитационной (почвенной капиллярной) составляющими бассейновой ёмкости, которые связаны соотношением:

$$c = av^m + b, \quad (1)$$

где

a , b и m – постоянные коэффициенты;

c и v – относительные свободные ёмкости, соответственно негравитационная и гравитационная.

Переход к абсолютным значениям выполняется по формулам:

$$c = \frac{(HB - C)}{HB}, \quad v = \frac{(ГКВ - V)}{ГКВ}, \quad (2)$$

где

C и V – текущие величины негравитационного и гравитационного влагозапасов;

HB – наименьшая влагоёмкость;

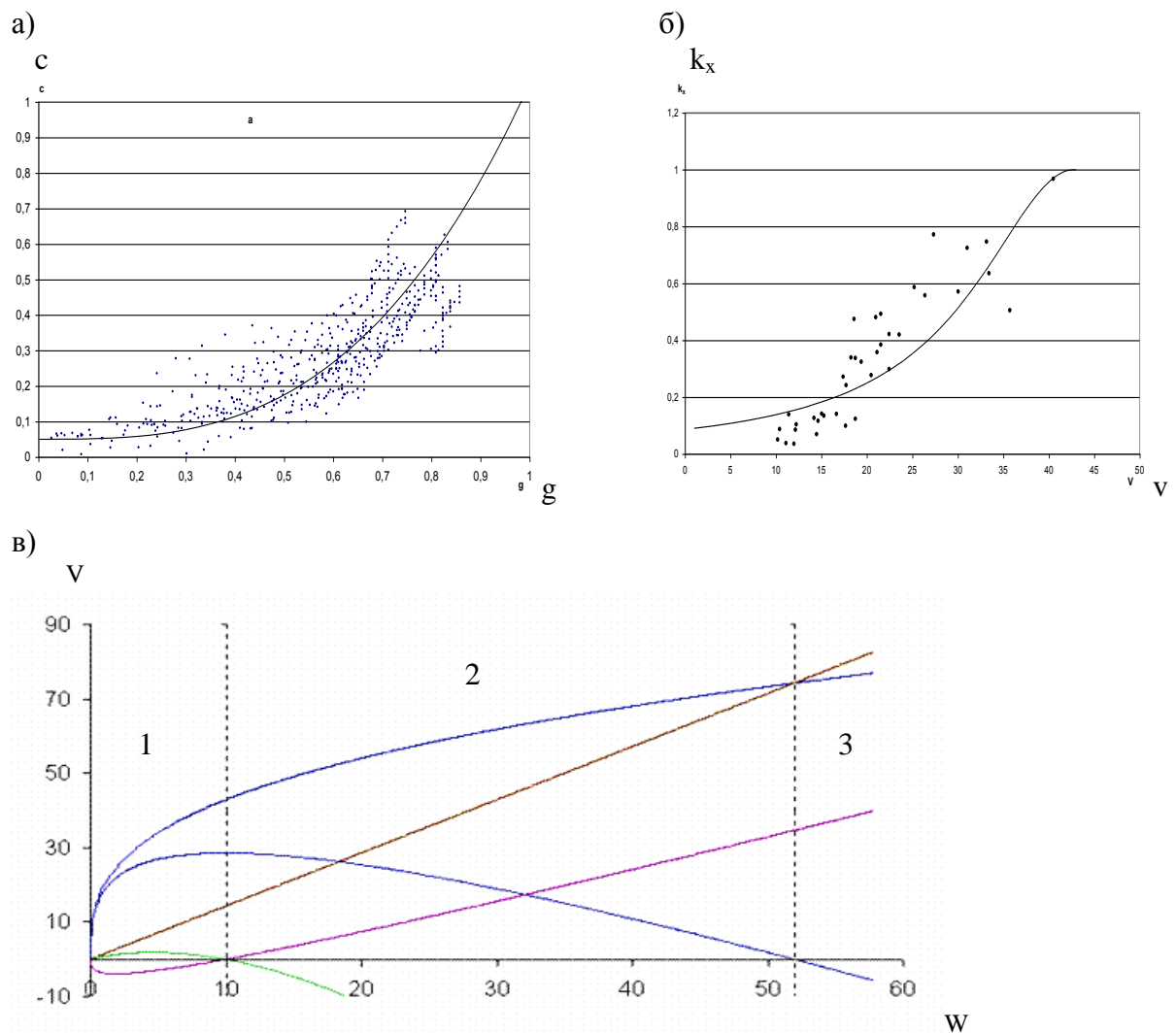
$ГКВ$ – гравитационная критическая влагоёмкость.

Характерные значения этих влагозапасов при расходе $Q = Q_{кр}$. Сумма НВ и ГКВ даёт полную влагоёмкость (ПВ МРБ), русловая критическая влагоёмкость (РКВ) составляет часть ГКВ при $Q=Q_{кр}$.

Предполагая непрерывное соблюдение формулы (1), получаем выражение для доли осадков, идущих на стокообразование k_x :

$$k_x = \frac{ГКВ^m}{m \cdot a \cdot (ГКВ - V)^{(m-1)} \cdot НВ + ГКВ^m}, \quad (3)$$

Данное соотношение применяется при $V < ГКВ$, иначе осадки полностью идут на стокообразование. Принятые зависимости в сопоставлении с эмпирическими данными представлены на рисунке 1а, б.



Примечание – а) зависимость $c=f(g)$ (1); б) зависимость $k_x=f(V)$ (3); в) фазовый портрет динамики гравитационной ёмкости (7), режимы стокообразования: «1» – внутриобъёмный, «2» – поверхностный, «3» – «провальный».

Рисунок 1 – Основные функциональные зависимости ПЦ-модели МРБ на примере бассейна р. Комаровка–Центральный

Стокоформирующая доля осадков попадает сначала в ёмкость «верховодки», которая имитирует трансформацию осадков при пересечении верхней границы бассейна. В применяемой версии ПЦ-модели верховодка описывается как единичная линейная ёмкость – постоянным коэффициентом пропорциональности между текущим значением влагозапаса и расходом $R_{\text{вер}}$. Наиболее важным элементом модели является гравитационная ёмкость и связанная с ней русловая ёмкость бассейна. Связь между ними можно назвать «вложением» – русловая ёмкость является частью гравитационной, причём доля руслового влагозапаса в гравитационном изменяется в зависимости от величины последнего. Такая структура введена для описания процессов превращения форм влаги, не полностью учитываемых стоковыми моделями «добегания», основанными на идеологии генетической формулы стока.

При основном режиме функционирования бассейна (внутриобъёмное стокообразование, $Q < Q_{\text{кр}}$) в модели присутствуют три формы жидкой влаги, движущейся под влиянием силы тяжести и расходуемой на сток – русловая, грунтовая и верховодка. Четвёртая форма жидкого влагозапаса – почвенная негравитационная (капиллярная), куда относятся все формы связанной почвенной влаги, движущейся не под действием гравитации и расходуемой на испарение. Превращения менее подвижных форм в более подвижные и обратно происходят при увеличении/уменьшении, соответственно, степени насыщения вмещающей среды, независимо от движения влаги в пространстве. Переход грунтового влагозапаса в русловый происходит при интенсивном «попятном» развитии поверхностной и подземной дренажной сети в периоды поступления больших объёмов осадков.

При дальнейшем насыщении профиля почвогрунтов верховодка также включается в состав гравитационного влагозапаса, а при переполнении бассейновой ёмкости наличие даже тонкого слоя поверхностного стекания приводит к исчезновению капиллярных сил. Таким образом, даже капиллярный влагозапас в отдельные моменты экстремального переувлажнения может переходить в гравитационный. Таким образом, предполагаем три качественно различных режима стокообразования – внутриобъёмный, поверхностный и «провальный».

Водный баланс гравитационной ёмкости, состоящей из русловой и грунтовой, описан системой уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dW}{dt} = -k_1 W + p(t) \\ \frac{dV}{dt} = -k_2 V^3 + h(t) \end{cases} \quad (4)$$

причём выполняются два условия

$$Q = k_1 W = k_2 V^3 \quad (5)$$

$$k_2 = \frac{k_1^3}{27Q_{кр}^2} \quad (6)$$

Условие формула (5) основано на предположении формулы (4), а формула (6) – на предположении формулы (5) из сформулированных выше.

В системе формулы (4):

W и V – обозначают русловую и гравитационную ёмкость соответственно,

k_1 и k_2 – постоянные коэффициенты (k_1 определяется через $R_{рус}$),

$p(t)$ – является притоком в русловую ёмкость из грунтовой (грунтовая ёмкость $G=V-W$),

$h(t)$ – является функцией внешнего притока в гравитационную ёмкость.

Решая формулу (4) с учётом формулы (6), исключив t и приняв Q за независимую переменную, получаем фазовый портрет системы (рисунок 5в):

$$W = \frac{Q}{k_1} \quad V = \frac{Q^3}{k_2} \quad G = \frac{Q^3}{k_2} - \frac{Q}{k_1} \quad (7)$$

$$p = Q - \frac{3k_2^{1/3}}{k_1 Q^{5/3}} \quad h = Q - \frac{k_1}{3} \left(\frac{Q}{k_2} \right)^{1/3} \quad (8)$$

Поскольку ПЦ-модель ориентирована на интегральное описание динамики МРБ вблизи состояния полной влагоёмкости, процессы внутрпочвенного влагообмена, испарения и т.д. описаны в ней с максимальной «грубостью». Негравитационный почвенный влагозапас рассматривается как единое целое. Его баланс заключается в приёме доли осадков и испарении влаги, суточная величина которого принята постоянной для всего тёплого периода года. В модели используются несколько интегральных параметров:

$Z_{гр}$ – интенсивность подпитки капиллярного влагозапаса;

$k_{пор}$ – коэффициент относительной свободной пористости бассейна;

$g_{глуб}$ – поток влаги из глубоких подземных горизонтов.

Таким образом, используемая версия ПЦ-модели представляет собой очень простой, по сравнению с наиболее современными моделями «осадки–сток», алгоритм формирования слоя стокообразования и трансформации его в расход в замыкающем створе. В расчётах, которые легко реализуются в любой среде программирования, используются только стандартные массовые данные по осадкам и стоку. Число параметров модели невелико, почти все они имеют ясную физическую интерпретацию и определяются либо по данным многолетних наблюдений на бассейне, лишь немногие определяются калибровкой [1-2].

2. Процессы руслового добегания и общая схема прогноза в замыкающем створе

Для описания процессов руслового добегания в пределах средних и крупных бассейнов (до 100–200 тыс. км²) наиболее целесообразно, с учетом наличия данных, использовать т.н. свертки или интеграла Дюамеля. Практически он используется в дискретном виде конечной суммы:

$$Q_i = k \sum_{t=1}^{t_{\max}} p(t)q(i-t+1) \quad (9)$$

где

q – посуточные величины притока в русловую сеть;

Q – посуточные расходы в замыкающем створе;

i – текущая расчетный шаг (момент времени);

p – ординаты функции влияния;

t и t_{\max} – текущая и максимальная величины предыстории, с которой учитывается приток для вычисления стока,

k – коэффициент размерности.

В качестве притока в русловую сеть крупного бассейна используются фактические и прогнозные расходы воды малых речных бассейнов, которые, таким образом, выступают как бассейны-индикаторы, являющиеся репрезентативными для отдельных частей водосбора.

В качестве функции влияния используется хорошо зарекомендовавшая себя кривая Калинина-Милюкова, теоретически выведенная для описания трансформации гидрографа серией одинаковых линейных водохранилищ.

$$p(t) = \frac{t^{n-1}}{\tau^n (n-1)!} e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (10)$$

где

t – время;

τ – константа руслового добегания;

n – количество условных емкостей.

В расчетах, функция влияния используется в виде дискретной конечной последовательности весовых коэффициентов, сумма которых должна быть равна единице. Это условие нарушается, во-первых, ограничением длины последовательности величиной t_{\max} . Во-вторых, для обеспечения заблаговременности прогноза на величину d суток за счет учета добегания необходимо обнулить соответствующее количество начальных ординат

функции влияния. Затем в ординаты вводятся поправки, приводящие их сумму к единице. Предельная величина заблаговременности за счет добегания, и предельная величина учета предыстории при прогнозе определяются количеством начальных ординат и номером конечной ординаты функции влияния, которые возможно обнулить без существенного искажения её формы.

Недостаток исходных данных и погрешности «огрубления» природных процессов приводят к тому, что, особенно в задаче краткосрочного прогнозирования, результаты моделирования почти никогда не могут быть использованы непосредственно из-за значительных ошибок. Поэтому результаты модельных расчетов рассматриваются как некий «индекс», более или менее связанный с конечной прогнозируемой величиной. На завершающем этапе прогнозирования используются эмпирические методы коррекции ошибок. В данном случае нами использован метод коррекции, основанный на применении многомерной регрессии, вида:

$$Q_{\text{for},i+d}=f(Q_{\text{mod},i+d}, Q_{\text{mod},i}, Q_{\text{obs},i}) \quad (11)$$

где

Q_{for} , Q_{mod} , Q_{obs} – расход прогнозный, моделированный и наблюдаемый соответственно;

i и d – текущий момент и заблаговременность прогноза.

Как показали эксперименты, такая комбинация предикторов позволяет достаточно точно учесть как систематическую, так и случайную погрешности моделирования.

Таким образом, общая схема прогноза включает в себя три этапа, как показано на рисунке 2.

На первом для каждого расчётного шага происходит настройка ПЦ-модели МРБ по каждому бассейну-индикатору, с использованием ежедневных расходов воды за период учитываемой предыстории и суточных сумм осадков одного или нескольких осадкомерных пунктов. Если осадкомерных пунктов, «тяготеющих» к бассейну-индикатору, несколько, то их данные осредняются. После достижения наилучшей настройки ПЦ-модели выполняется расчёт на три шага (дня) вперёд, с использованием прогноза осадков по градациям. Параметры ПЦ-модели для каждого бассейна-индикатора рассчитываются или оптимизируются заблаговременно, на основании многолетних данных по осадкам и стоку на этом бассейне. В процессе настройки оптимизируются только краевые условия.

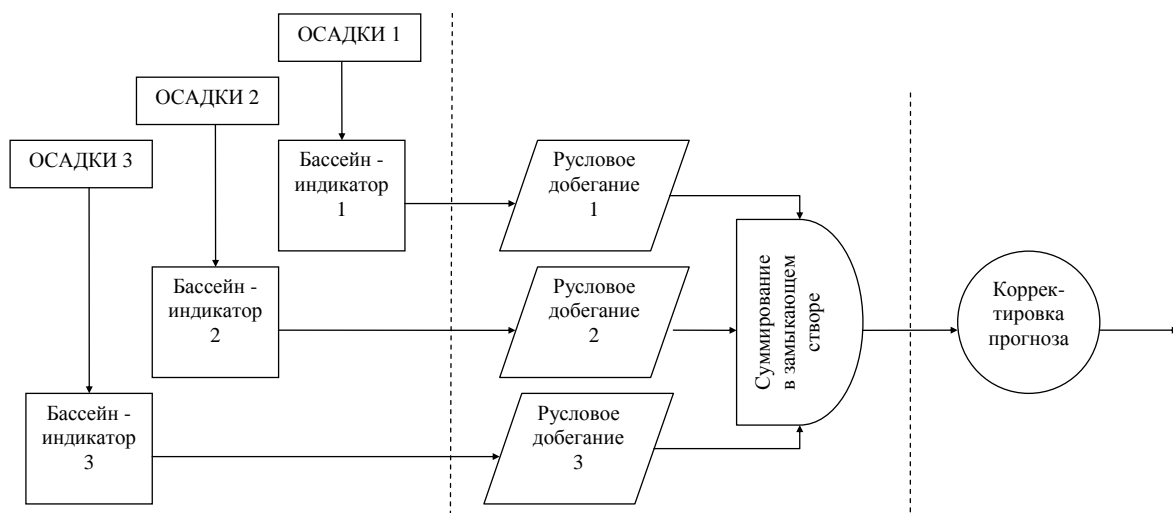


Рисунок 2 – Принципиальная схема прогноза стока в замыкающем створе бассейна площадью 10000–100000 км²

На втором этапе последовательность измеренных и моделированных расходов каждого бассейна-индикатора длиной $t_{\max}+3$, т. е. фактическая предыстория и прогноз, подвергается трансформации по формуле (9), с использованием частной функции влияния, скорректированной на заблаговременность 0–3 дня. В результате получаем прогноз стока с частного водосбора, тяготеющего к бассейну-индикатору, в замыкающем створе с заблаговременностью 1–6 суток, 3 из которых обеспечиваются прогнозом осадков и 3 – русловым добеганием. В замыкающем створе гидрографы стока с частных площадей водосбора суммируются с соответствующими весовыми коэффициентами. Параметры частных кривых добегания и весовые коэффициенты суммирования определяются предварительно, путем оптимизации с использованием измеренных расходов воды бассейнов-индикаторов и замыкающего створа за многолетний период.

На третьем этапе происходит корректировка полученных модельных расходов с использованием формул типа (11), параметры которых оцениваются путем эксперимента на зависимой выборке.

Качество методики характеризуется стандартной оценкой, принятой в Росгидромете:

$$\Omega = \frac{1}{3} \frac{S_{зав}}{\sigma_{зав}} + \frac{2}{3} \frac{S_{нез}}{\sigma_{нез}} \quad (12)$$

где

$S_{зав}$ и $S_{нез}$ – среднеквадратическая ошибка прогноза по зависимой и независимой выборке,

соответственно:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_1^N (Q_{for,i} - Q_{obs,i})^2}{N}} \quad (13)$$

$\sigma_{зав}$ и $\sigma_{нез}$ – среднеквадратическая изменчивость прогнозируемой величины за период заблаговременности прогноза по зависимой и независимой выборке,

соответственно:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_1^N (Q_{obs,i+d} - Q_{obs,i})^2}{N}} \quad (14)$$

3. Испытания ПЦ-модели МРБ в задаче краткосрочного прогноза стока

В качестве объектов для авторских испытаний методик краткосрочного прогноза стока дождевых паводков использованы семь малых речных бассейнов в бассейне р. Уссури. Экспериментальные бассейны выбирались таким образом, чтобы отразить реальное состояние оперативной наблюдательной сети и максимально возможное разнообразие природных условий.

Методика численного эксперимента заключается в следующем. Основные параметры модели приняты на основании предварительно выполненного анализа полных многолетних рядов наблюдений за ежедневными осадками и стоком. Используются ежедневные данные только за тёплый период каждого года – с июня по сентябрь. Для выдачи прогноза на каждый день тёплого периода сначала выполняется настройка модели – подбор оптимальных значений величины капиллярного влагозапаса и среднего испарения за период в 7 предшествующих дней, включая день выдачи прогноза (от $i-6$ до i , где i – день выдачи прогноза). Признаком оптимальности служит максимальное совпадение наблюденного и моделированного гидрографов каждой семидневки, оцениваемое тремя мерами – средним абсолютным отклонением, среднеквадратическим отклонением и мерой Нэша-Сатлифа [7]. После настройки текущего состояния модели выполняется расчёт величины стока на 3 суток вперёд (от $i+1$ до $i+3$).

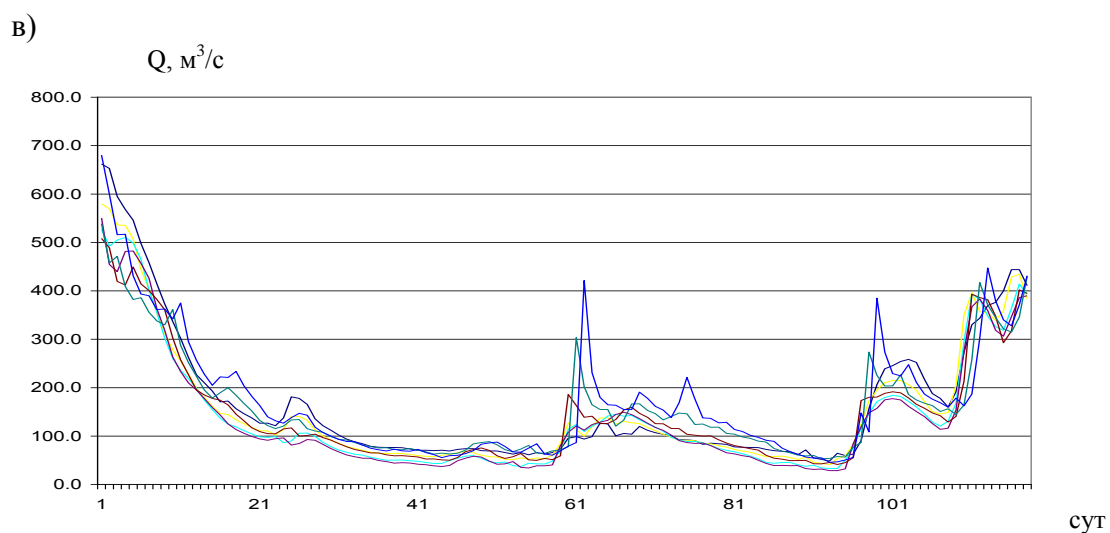
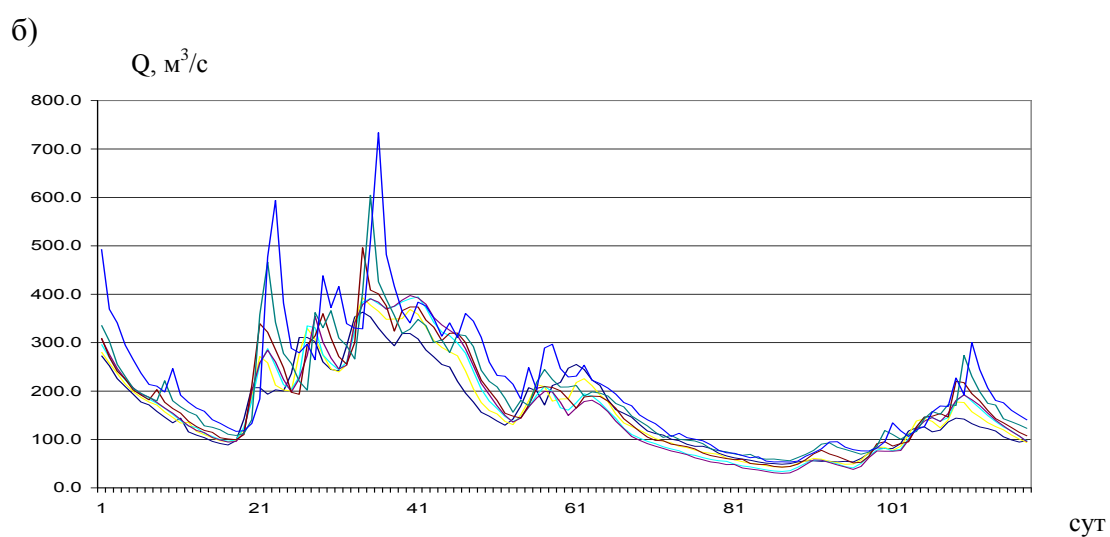
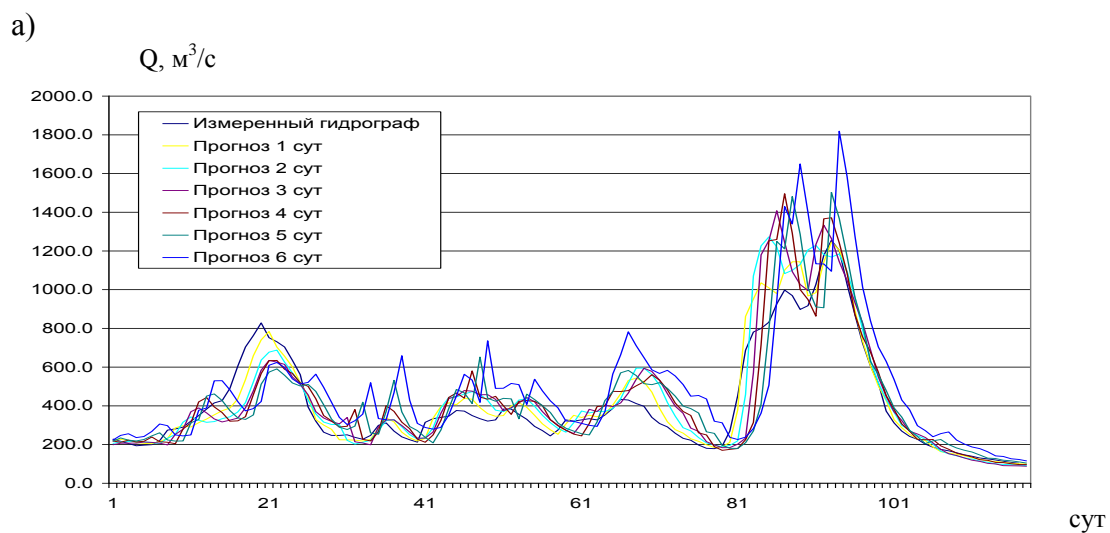
Указанный расчёт выполняется с использованием измеренных значений ежедневных осадков по станциям и постам, т. е. в условиях 100 %-го прогноза на 3 суток вперед, т. к. целью данного этапа является калибровка параметров модели паводочного цикла для бассейнов-индикаторов. Результаты прогнозирования оценивались путём сравнения наблюденного и прогнозируемых гидрографов, а также с помощью стандартной оценки

качества методики прогноза, принятой в Росгидромете. Эта оценка равна отношению среднеквадратической ошибки прогноза к среднеквадратической величине естественной изменчивости процесса за период заблаговременности прогноза. Величина отношения менее 0,5 соответствует хорошему, менее 0,8 – удовлетворительному качеству методики. На основании указанных оценок подбирались оптимальные значения вспомогательных параметров модели – величины глубокого подземного водообмена и показателя истощения влагозапаса верховодки. Таким образом, на основе использования ПЦ-модели МРБ практически гарантировано можно получать методики краткосрочного прогноза дождевого стока заблаговременностью от 1 до 3 суток при реально существующих условиях обеспечения оперативной гидрометеорологической информацией и соблюдении основных ограничений модели. Главным из этих ограничений является площадь водосбора, не превышающая 1500–2000 км². Также немаловажным является требование однородности подстилающей поверхности и «правильного» (закономерного) строения речной сети бассейна.

Кроме размера бассейна, качество прогнозов явно зависит от плотности осадкомерной сети и качества наблюдений за стоком, что является свидетельством адекватности модели. Снижение оценки качества происходит преимущественно за счёт отдельных значительных паводков, которые наблюдаются в замыкающем створе бассейна, однако не имеют соответствующих паводкообразующих осадков. Следовательно, грубые ошибки прогноза наступают именно за счёт неполноты данных об осадках, что отражается и на средних оценках качества. Получение методик хорошего качества, с оценкой менее 0,5 в общем маловероятно из-за того, что имеющиеся стандартные данные имеют слишком низкое пространственно-временное разрешение относительно тех размеров бассейнов, которые наиболее адекватны ПЦ-модели.

Но даже при этих условиях заблаговременность, а, следовательно, и ценность прогнозов паводков на малых реках останется низкой. Наиболее перспективным представляется использование ПЦ-модели в качестве «функции потерь стока» для прогнозов стока в замыкающих створах крупных и средних рек. В этой роли она может резко улучшить качество того вида краткосрочных гидрологических прогнозов, который является наиболее практически значимым.

На рисунке 2 приведены измеренные и прогнозные гидрографы стока по результатам испытаний в оперативном режиме.



Примечание – а) 2002 год, б) 2004год, в) 2007год

Рисунок 2 – Измеренные и прогнозные гидрографы с заблаговременностью 1–6 суток в створе р. Уссури–п. Кировский

В начале каждого расчетного сезона имеется период с грубыми ошибками прогнозов, относящиеся к маю, когда значительную величину составляет талый сток, не учитываемый в модели, и потери на водосборе значительно меньше, чем это типично для летне-осеннего сезона. Методика неприменима для таких условий и в приводимых оценках качества май не включен. Нередко наилучшая оценка качества соответствует варианту прогноза не по измеренным осадкам, а по градациям. Это означает, что имеющиеся данные об осадках по станциям так искажают величины средних по бассейну осадков, что надёжнее использовать их как данные только о градации выпавших осадков. Нередко также лучшие оценки качества получаются для прогноза на 2–3 суток, чем на одни сутки. Это обусловлено быстрым нарастанием естественной изменчивости стока по мере увеличения заблаговременности, в то время как ошибки модельных расчётов возрастают медленно, что тоже свидетельствует об адекватности применяемой модели.

4. Реализация прогноза

Программа прогноза реализована в виде рабочей книги Excel Workbook, этапы алгоритма выполняются макросами Visual Basic, базой исходных данных служит автоматизированный архив гидрометеорологической информации, созданный и поддерживаемый в течение ряда лет автором. Последовательность работы программы состоит в следующем. Сначала из таблицы Excel считываются названия пунктов-индикаторов, замыкающих створов, осадкомеров, даты начала и окончания периода, в течение которого выполняется ежедневное прогнозирование, и все необходимые параметры. На основании этого из файлов прямого доступа считываются исходные данные за период прогнозирования – ежедневные расходы воды и суточные суммы осадков по пунктам, которые затем трансформируются следующим образом.

Подробно об этих параметрах в [3-6]. Определение этих параметров выполняется на анализе полных многолетних рядов наблюдений за ежедневными осадками и стоком.

Ряды ежедневных расходов пересчитываются из $\text{м}^3/\text{с}$ в $\text{мм}/\text{сут}$ и все дальнейшие расчеты выполняются в этих единицах. Суточные суммы осадков осредняются, если одному бассейну-индикатору отвечает более одного осадкомерного пункта. Затем полученные ряды измеренных «средних по бассейну» осадков преобразуются в ряды осадков «по градациям» - измеренное значение каждых суток заменяется эффективным значением, установленным для соответствующей градации. Затем заводится цикл, в процессе выполнения которого пробегаются подряд дни периода прогнозирования. На каждый день формируется набор преобразованных исходных данных, включая предысторию в 11 дней, включая текущий, и 6 дней следующих за ним.

Затем для каждого бассейна-индикатора выполняется настройка ПЦ-модели на текущей предыстории, включая дату выдачи прогноза, как описано в п. 2, с использованием измеренных расходов и осадков. После достижения оптимальной настройки выполняется прогноз на 3 дня вперед с использованием осадков по грациям за эти дни. В результате первого этапа формируется последовательность расходов на интервале времени $\{i-10, i+3\}$, включающая 11 измеренных расходов и 3 спрогнозированных. Эта последовательность четырежды подвергается трансформации по формуле (9) с использованием 4-х вариантов частной кривой добегания – исходной (0-заблаговременность) и скорректированной на 1, 2 и 3-дневную заблаговременность.

В результате получается 7 значений частного прогноза – с заблаговременностью 0–6 дней. При этом значение 0-прогноза получается с использованием исходной кривой добегания, 1-4-прогнозов – с использованием кривой добегания, скорректированной на 1 сутки заблаго-временности (она почти не отличается от исходной), 5 и 6-прогнозов – с использованием кривых добегания, скорректированных на 2 и 3 суток заблаговременности соответственно. Полученные частные прогнозы суммируются в замыкающем створе с заранее определенными весами.

В 2013 году автоматизированный метод краткосрочного прогноза гидрографа стока и уровней воды в бассейне реки Уссури внедрен в оперативную работу ОГРП ГМЦ Приморского УГМС для следующих постов:

- р. Уссури - пос. Кировский (с заблаговр. 4-6 суток) в качестве основного метода,*
- р. Уссури - с. Кокшаровка (с заблаговр. 1-4 суток) в качестве основного метода,*
- р. Большая Уссурка - с. Роцино (с заблаговр. 1-5 суток) в качестве основного метода,*
- р. Большая Уссурка - с. Вагутон (с заблаговр. 2-6 суток) в качестве основного метода,*
- р. Малиновка - с. Ракитное (с заблаговр. 1-4 суток) в качестве основного метода,*
- р. Бикин - п. Звеньевой (с заблаговр. 1-6 суток) в качестве основного метода,*
- р. Большая Уссурка – п. Вагутон (с заблаговр. 1 сутки) в качестве вспомогательного метода,*
- р. Уссури – пос. Кировский (с заблаговр. 1-3 суток) в качестве вспомогательного метода.*

Список использованных источников

1 Гарцман Б. И. Эффект бассейнового контррегулирувания при формировании экстремальных дождевых паводков // География и природные ресурсы. – 2007. – № 1. – С. 14–21.

- 2 Гарцман Б. И., Губарева Т. С. Прогноз гидрографа дождевых паводков на реках Дальнего Востока // Метеорология и гидрология. – 2007. – № 5. – С. 70–80
- 3 Гарцман Б. И. Паводочный цикл малого речного бассейна: авторефер. дисс. канд. геогр. наук / Гарцман Борис Ильич. – Иркутск: ИГ СО РАН, 1993. – 19 с.
- 4 Гарцман Б. И. Феномен контррегуляции стока в модели паводочного цикла малого речного бассейна // География и природные ресурсы. – 2001. – № 2. – С. 142–149.
- 5 Гарцман Б. И., Бугаец А. Н. Использование модели паводочного цикла малого речного бассейна в расчетах максимального стока / Гидрометеорология и экология Дальнего Востока. Тематический сборник ДВНИГМИ № 4. – Владивосток: Дальнаука, – 2003. С. 76–93.
- 6 Гарцман Б. И., Макагонова М. А. Применение модели паводочного цикла малого речного бассейна (ПЦ-модели МРБ) в задачах гидрологических прогнозов // Экстремальные гидрологические события: теория, моделирование и прогнозирование. Тр. Международной научной конференции. – М. 2003. С. 67–72.
- 7 Nash J. E., Sutcliffe J. V. River flow forecasting through conceptual models. Part 1 – A discussion of principles // J. Hydrol. 1970. – Vol. 10. – P. 282.