

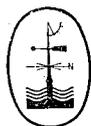
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ СССР ПО ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ  
И КОНТРОЛЮ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

ОРДЕНА ЛЕНИНА ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ  
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР СССР

А. П. Жидиков, Н. С. Нечаева

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ  
по разработке схем  
краткосрочных прогнозов  
расходов воды рек  
и притока воды в водохранилища  
в период половодья  
на основе моделей талого стока  
(на примере бассейна р. Волги)

Под редакцией  
канд. техн. наук В. А. Бельчикова



ЛЕНИНГРАД ГИДРОМЕТЕОИЗДАТ 1982

УДК 556.5.06

Одобрено  
приказом Центральной методической комиссии  
по прогнозам  
от 16 ноября 1979 г.

Р0017

М 1903030200-146 без объявл.  
069(02)-82

© Гидрометеоздат, 1982 г.

## ВВЕДЕНИЕ

Каскады водохранилищ, созданные на таких крупных реках, как Волга, значительно усложнили задачу по разработке методов краткосрочных прогнозов весеннего стока с требуемой для народного хозяйства заблаговременностью (5—7 сут).

Возникшие трудности в первую очередь обуславливаются тем, что значительная часть незарегулированного притока в крупные водохранилища происходит по большому числу малых рек, на которых естественное время добегания воды составляет лишь 1—3 сут, т. е. меньше требуемой заблаговременности прогноза.

В сложившихся условиях при разработке методов прогноза весеннего притока в крупные водохранилища было признано целесообразным использование комбинированных схем. Это значит, что для значительных рек, на которых естественное время добегания воды больше заблаговременности прогноза, методы должны основываться на расчетах трансформации паводочных волн, а для малых рек — на моделях формирования талого стока.

На основе таких схем за последнее десятилетие в Гидрометцентре СССР разработаны и внедрены в практику методы прогноза весеннего притока в каскад волжско-камских водохранилищ с заблаговременностью до 5 сут [3, 4, 6]. Начиная с 1975 г. эти прогнозы выпускаются в Гидрометцентре СССР в автоматизированном режиме за весь период половодья.

При разработке метода краткосрочного прогноза весеннего половодья рек бассейна Волги построены модели для 32 частных бассейнов, в том числе на водосборах Ивановского водохранилища — 2, Угличского — 1, Рыбинского — 3, Горьковского — 14, Куйбышевского — 9, Нижнекамского — 3. В 17 случаях из 32 модель построена для речных бассейнов (районов) с площадями от 2 до 8 тыс. км<sup>2</sup>. Предполагается, что эти размеры площадей при использовании модели талого стока являются оптимальными [3, 9]. За последние годы модель применялась также для бассейнов с площадями 20 тыс. км<sup>2</sup> и более [4]. Опыт показал, что точность расчета (прогноза) гидрографа половодья для частных бассейнов как с оптимальными площадями, так и с большими (порядка 20 тыс. км<sup>2</sup>) примерно одинакова.

В настоящих Указаниях излагается опыт, накопленный при разработке и использовании методов прогноза для рек бассейна Волги. В них рассматриваются:

- методические подходы, используемые при разработке методов краткосрочных прогнозов весеннего половодья на реках;
- конкретные примеры разработки методов прогнозов ежедневных расходов воды небольших рек, притока воды в отдельные водохранилища, а также в крупные каскады на основе расчетов снеготаяния и добегания воды по руслевой сети;
- рекомендации по определению параметров расчетных и прогностических схем, а также по разработке технологической линии по автоматизированному выпуску прогнозов.

Хотя в Указаниях изложены опыт и рекомендации на примере Волжского каскада водохранилищ, тем не менее авторы обращают внимание на известную универсальность методологии, благодаря которой принципиальные схемы расчетов и краткосрочных прогнозов могут быть использованы для других речных систем и водохранилищ на равнинных территориях с устойчивым снежным покровом.

Алгоритмы всех прогностических, расчетных и коррекционных схем составлены таким образом, чтобы по мере совершенствования любого из элементов схемы, например расчета снеготаяния или расчета потерь, можно было внести изменения только в локальный блок программы, не меняя общей схемы.

В Указаниях также обращается внимание на трудности, встречающиеся при внедрении предлагаемых методов прогноза. В связи с этим подчеркивается, что схемы прогнозов, в основе которых лежат модели формирования талого стока, могут быть реализованы лишь на ЭВМ. В то же время такие методы позволяют составлять краткосрочные прогнозы гидрографов рек в период весеннего половодья для многочисленных створов речных систем, отдельных водохранилищ и целых каскадов для улучшения обслуживания энергетических систем, а также для будущего обслуживания АСУ водными ресурсами. Опыт показал, что наибольшая эффективность применения таких методов может быть достигнута путем создания автоматических линий, включая обработку информации и выпуск прогнозов.

Настоящие Указания составлены в отделе исследований по речным гидрологическим прогнозам Гидрометцентра СССР в соответствии с решением ЦМКП Госкомгидромета.

## 1. МЕТОДЫ ПРОГНОЗА (РАСЧЕТА) РАСХОДОВ ВОДЫ МАЛЫХ РЕК НА ОСНОВЕ СНЕГОТАЯНИЯ

Опыт показывает, что обоснованный прогноз расходов воды малых рек в весенний период может базироваться на предвычислении снеготаяния, потерь и добегаания воды, т. е. на моделях, описывающих процесс формирования талого стока. Причем при использовании фактических исходных метеорологических данных заблаговременность предсказания расходов воды небольших равнинных рек с площадями водосбора 4—8 тыс. км<sup>2</sup> составляет 2—3 сут. При прогнозе метеорологических элементов на несколько суток вперед заблаговременность прогноза расходов воды таких рек увеличивается до 5 сут, что имеет большое практическое значение.

### 1.1. Описание моделей формирования талого стока

Модели рассматриваемого класса детально описаны в работах [3, 9]. В настоящем разделе остановимся лишь на двух упрощенных вариантах модели, т. е. на тех, которые просты в использовании и нашли наиболее широкое распространение в практике. Оба варианта дают положительные результаты при прогнозах ежедневных расходов воды рек частично залесенных бассейнов в период половодья.

Первый вариант назовем полным, так как он позволяет рассчитывать снеготаяние, потери и водоотдачу, а также добегаание воды до замыкающего створа реки отдельно для полевой и лесной частей бассейна. Довольно часто в этом варианте потери и сток для всего бассейна принимаются одинаковыми. В таком случае разница в стоке с полевой и лесной частей бассейна учитывается лишь исходя из значений коэффициента лесистости. В тех же случаях, когда материалы наблюдений позволяют определить потери и сток для поля и леса отдельно, при использовании полного варианта модели этими данными следует воспользоваться.

Во втором варианте, назовем его неполным, отдельно для поля и леса, рассчитывается лишь снеготаяние, а потери и водоотдача принимаются одинаковыми для всего бассейна. Расчет поступления воды к замыкающему створу реки производится по одной кривой добегаания.

Таким образом, основными различиями перечисленных вариантов являются способы учета потерь в поле и в лесу, а также расчет добегаания воды от места ее поступления в ручейковую сеть до замыкающего створа реки.

Следует заметить, что оба варианта модели становятся совершенно одинаковыми, когда используются при расчетах (прогнозах) гидрографа весеннего половодья для открытых или для полностью залесенных бассейнов рек.

Рассматриваемая модель относится к классу моделей с сосредоточенными параметрами, т. е. она описывает процессы, происходящие на бассейне и в русловой сети только как функции времени, без их привязки к определенным частям бассейна. Во всех случаях при построении модели для конкретных бассейнов допускается, что эти бассейны в гидрометеорологическом отношении более или менее однородны. Поэтому, чтобы смоделировать талый сток на крупных речных бассейнах, необходимо их разделить на однородные (частные) водосборы, для каждого из них разработать свою модель, а затем частные модели объединить в общую.

Расчет (прогноз) весеннего половодья по обоим вариантам модели предусматривает последовательное определение следующих суточных значений:

— интенсивности таяния снега и отдачи талой воды снежным покровом с учетом плотности и влажности снега; жидких осадков и относительной площади покрытия водосбора снегом;

— водоотдачи бассейна (притока воды в ручейковую сеть) с учетом неравномерности поглощения талой и дождевой воды, поступающей на поверхность бассейна в период снеготаяния. Допускается, что потери жидких осадков в этот период одинаковые с потерями талой воды;

— ежедневных расходов воды в замыкающем створе реки по данным о поступлении воды в русловую сеть с учетом неодновременности ее добегаания, а также и грунтовой составляющей.

Ниже приводятся уравнения, по которым осуществляется последовательный расчет элементов водного баланса по обоим вариантам модели начиная от интен-

сивности снеготаяния и заканчивая гидрографом стока в замыкающем створе реки (района).

1.1.1. Суточные значения снеготаяния (мм/сут). Для лесной и полевой частей бассейна их рекомендуется рассчитывать с помощью простейшей формулы

$$h_c = \begin{cases} at_{cp} \\ 0 \text{ при } t_{cp} \leq 0, \end{cases} \quad (1)$$

где  $t_{cp}$  — средняя суточная температура воздуха,  $a$  — коэффициент стаивания.

Этот расчет основан на допущении, что интегральным показателем теплопритока к поверхности снега является только положительная температура воздуха.

Несмотря на простоту этот способ зарекомендовал себя достаточно надежно при использовании для прогнозов весеннего стока рек лесной зоны Европейской территории СССР. Его обоснование дано в работах [3, 8, 12]. Вместе с тем известно, что положительная температура воздуха часто не может служить единственным показателем интенсивности снеготаяния, особенно на открытых частях водосбора. Здесь снеготаяние зависит также от лучистого теплообмена и от скорости ветра, а следовательно, при повышении положительной средней суточной температуры на  $1^\circ\text{C}$  стаивает неодинаковое количество снега.

Поэтому наряду с простейшим расчетом по соотношению (1) существуют и другие, более детальные, методы расчета снеготаяния для открытых частей бассейна, основанные на тепловом балансе. К ним в первую очередь следует отнести методы Е. Г. Попова [12]. Несомненно, эти методы физически более обоснованы и при расчетах снеготаяния по фактическим данным дают лучшие результаты по сравнению с расчетами по уравнению (1). Однако в оперативных условиях, когда приходится пользоваться прогнозом ряда метеорологических элементов на 1–3 сут, детализация этих методов оказывается недостаточно эффективной, поэтому в этих условиях предпочтение отдается простому соотношению (1).

Для рассматриваемых целей нередко используется метод расчета снеготаяния, основанный на номограмме Л. Г. Шуляковского [3]. Этот метод рекомендуется использовать в первую очередь для расчета снеготаяния в безлесных речных бассейнах, расположенных в степных и лесостепных зонах Европейской территории СССР. Номограмма Шуляковского представляет собой зависимость вида

$$h_c = f(t, D),$$

где  $D$  — дата, на которую рассчитывается интенсивность снеготаяния.

Номограмма проста в использовании: для расчета интенсивности снеготаяния требуется информация лишь о средней дневной ( $t_d$ ) или суточной ( $t_{cp}$ ) температуре воздуха:

$$h_c = a_p t_p, \quad (2)$$

где  $a_p$  — средний коэффициент стаивания для всего диапазона изменения температуры воздуха по номограмме на определенную дату;  $t_p$  — расчетная температура воздуха, определяемая по формуле

$$\begin{aligned} t_p &= t_\phi + \Delta t, \\ \Delta t &= \beta_1 D + b, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $t_\phi$  — фактическая температура воздуха.

Тогда

$$t_p = t_\phi + (\beta_1 D + b). \quad (4)$$

Подставляя величины из формул (3) и (4) в выражение (2), получаем

$$h_c = \begin{cases} a_p [t_\phi + (\beta_1 D + b)], \\ 0 \text{ при } t_{cp} \leq -2^\circ\text{C}. \end{cases} \quad (5)$$

На основании обобщения данных по 10 пунктам установлено, что  $a_p$  изменяется от 2,8 до 6,5, значение  $D$  принимается от 0 до 100 сут.

Для расчета интенсивности снеготаяния на полевой части бассейна целесообразно использовать не постоянный для всего периода снеготаяния коэффициент  $a$ , а переменный как во времени, так и по территории.

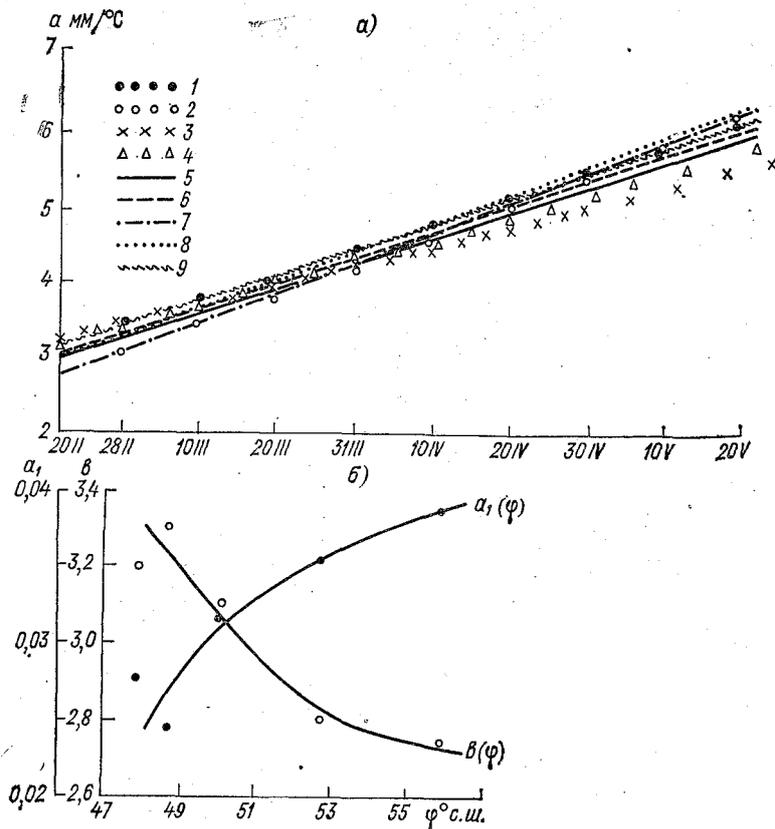


Рис. 1. Изменение во времени и по территории коэффициентов стаивания, вычисленных на основе номограмм Л. Г. Шуляковского по различным пунктам наблюдений (а), а также коэффициентов  $a_1$  и  $b$  в зависимости от широты места  $\varphi$  (б).

1 — Орел; 2 — Москва, Мелекес, Кинешма; 3 — Волгоград; 4 — Днепропетровск; 5 — Нижнедевицкая стоканая станция; 6 — Белгород; 7 — Елец; 8 — Курск; 9 — средний коэффициент стаивания по 10 пунктам.

Для выявления закономерностей изменения коэффициента стаивания во времени и в пространстве использованы номограммы Шуляковского, построенные для 10 пунктов, расположенных в различных районах Европейской территории СССР (Волгоград, Днепропетровск, Орел, Курск, Белгород, Елец, Москва, Мелекес, Кинешма, Нижнедевицкая стоканая станция).

По указанным номограммам для различных дат, начиная с 20/II, были определены значения коэффициентов стаивания. Зависимость коэффициентов  $a_p$  от времени и места расположения пунктов показана на рис. 1 а.

В общем виде такая зависимость выражается уравнением

$$a_p = a_1 D_1 + b, \quad (6)$$

где  $D_1$  — дата расчетных суток, равная числу суток начиная от ранней даты снеготаяния (в данном случае за начальную дату примем 20/II);  $a_1$  — коэффициент,  $b$  — свободный член.

Анализ номограмм для различных районов показал, что значения  $a_1$  и  $b$  зависят от широты места (рис. 1 б).

При необходимости можно воспользоваться осредненным коэффициентом стаивания, зависящим от времени, но без учета широты места. Осредненные зна-

чения коэффициента для зоны Европейской территории СССР, расположенной между 47—57° с. ш., в зависимости от времени  $D_1$  могут определяться по выражению

$$a_p = 0,034D_1 + 3,0. \quad (7)$$

С учетом переменного коэффициента стайвания интенсивность снеготаяния может быть вычислена по выражению

$$h_c = (a_1 D_1 + b) t_p. \quad (8)$$

**1.1.2. Слой отдачи талой воды снегом.** Определяется с учетом его водоудерживающей способности, изменение которой в период снеготаяния представляет собой сложный и малоизученный процесс [3, 9, 12]. В связи с этим при расчетах водоотдачи снега приходится принимать одно из двух допущений: 1) в период снеготаяния водоудерживающая способность снега изменяется по экспоненциальной зависимости или 2) водоудерживающая способность снега остается постоянной.

Опыт показывает, что предпочтение следует отдавать первому допущению [3]. В этом случае водоотдача снега рассчитывается по следующим уравнениям:

$$h_b = \begin{cases} H_n - H_{n-1} = [z_n - \gamma_n (1 - z_n)] x - [z_{n-1} - \gamma_{n-1} (1 - z_{n-1})] x, \\ 0 \text{ при } z_n \leq z_0, \end{cases} \quad (9)$$

где  $x$  — запас воды в снеге к началу снеготаяния;  $H_n$  и  $H_{n-1}$  — интегральная водоотдача снега за данные и предыдущие сутки;  $z_n$  и  $z_{n-1}$  — соответственно относительное стайвание снега на данные и предшествующие сутки, равное

$$z_n = H_n/x = \left( \sum_1^n h_c \right) / x; \quad (10)$$

$z_0$  — относительная убыль снега, при которой начинается водоотдача, приближенно равная

$$z_0 = \begin{cases} 0,34\gamma_{\max} + 0,059 \text{ при } \gamma_{\max} \leq 0,28, \\ 0,25\gamma_{\max} + 0,083 \text{ при } \gamma_{\max} > 0,28, \end{cases} \quad (11)$$

где  $\gamma_{\max}$  — максимальная влагоемкость снега, вычисляемая по соотношению

$$\gamma_{\max} = \exp(-4\rho) - 0,04; \quad (12)$$

$\gamma_n$  — текущая влагоемкость снега на каждую дату, определяемая по формуле

$$\gamma_n = \begin{cases} (\gamma_{\max} - 0,06) \exp(-4z_n) + 0,06 = \{[\exp(-4\rho) - 0,04] - \\ - 0,06\} \exp(-4z_n) + 0,06; \\ 0 \text{ при } \gamma_n < 0,063, \end{cases} \quad (13)$$

где  $\rho$  — плотность снега перед началом снеготаяния.

В тех случаях, когда расчеты снеготаяния делаются при втором допущении, т. е. при постоянной водоудерживающей способности снега, следует пользоваться уравнениями, приведенными в работах [3, 9].

**1.1.3. Подача талой воды на поверхность бассейна  $h$ .** Определяется с учетом покрытости бассейна снегом  $\Phi$ , изменяющейся в период снеготаяния от 100 % до нуля. При выпадении жидких осадков  $x'$

$$h = \Phi h_b + x', \quad (14)$$

$$\Phi = 1 - F, \quad (15)$$

где  $F$  — относительная площадь бассейна, освободившаяся от снежного покрова, определяется с помощью кривой гамма-распределения [3, 9]. Для практических расчетов значений  $F$  удобно воспользоваться следующим уравнением:

$$F = \sum_1^n \left\{ e^{[\alpha \ln \alpha_0 - \ln \Gamma(\alpha_0) + (\alpha_0 - 1) \ln z - \alpha_0 z_n]} \Delta z_n \right\}, \quad (16)$$

где  $\alpha_0$  — параметр, численно равный  $1/C_0^2$ ;  $C_0$  — коэффициент вариации, характе-

ризующий распределение по бассейну запасов воды в снежном покрове;  $\Delta z_n$  — изменение относительной убыли снега за сутки, равное  $z_n - z_{n-1}$ .

В периоды интенсивного снеготаяния происходят резкие суточные изменения значений  $z_n$ , а следовательно, и  $\Delta z_n$ . Такие изменения приводят к значительным ошибкам в расчетах  $F$  по формуле (16), а следовательно, и покрытости бассейна снегом. Во избежание таких ошибок изменяется порядок расчета  $\Delta z_n$ , когда создается ситуация, при которой  $\Delta z_n > 0,15$ .

В данном случае расчет  $F$  по формуле (16) производится в четыре этапа, на первом из которых используется  $\Delta z_n/4$ , а на последнем  $\Delta z$ .

**1.1.4. Суммарные потери стока и суточная водоотдача бассейна.** Вычисляются исходя из теории стока, изложенной в работе [12]. Согласно этой теории, суточная водоотдача бассейна в период снеготаяния осуществляется пропорционально действующей площади  $F_d$ , которая по своему смыслу отражает понятие суточного коэффициента стока. Иногда  $F_d$  также называют коэффициентом водоотдачи  $K_b$ .  $F_d$  (или  $K_b$ ) описывается уравнением вида

$$F_d = 1 - \exp[-H(T)/P(m)], \quad (17)$$

где  $P(m)$  — параметр, характеризующий суммарные потери талых вод при предельном увлажнении  $m$ .

Этот параметр определяется исходя из известного интегрального уравнения стока за половодье, имеющего следующий вид:

$$y = x - P(m) \{1 - \exp[-H(T)/P(m)]\}, \quad (18)$$

где  $H(T)$  — подача воды на водосбор за время  $T$ , т. е. за период от начала снеготаяния до интересующих нас суток, численно равная  $\sum_1^T h$ .

При расчетах допускается, что потери жидких осадков, выпадающих в период снеготаяния, такие же, как и потери талой воды. Здесь следует подчеркнуть, что при возврате холодов во время снеготаяния ежедневные осадки, выпадающие при  $t \leq 0^\circ\text{C}$ , считаются твердыми, а при  $t > 0^\circ\text{C}$  — жидкими. В расчетах предусмотрено, что все осадки, выпадающие при первом условии, добавляются к запасам воды в снежном покрове.

В конечном счете, исходя из формул (7) и (10), суточные значения водоотдачи бассейна, т. е. приток воды в ручейковую сеть, рекомендуется определять по выражению

$$y_c = \begin{cases} hF_d = h \{1 - \exp[-H(T)/P(m)]\}, \\ 0 \text{ при } F_d = 0. \end{cases} \quad (19)$$

В рассматриваемых вариантах модели расчета потерь и водоотдачи за каждые сутки допускается, что общие потери и сток талых вод за период половодья известны к началу снеготаяния. Таким образом, для реализации этой модели в целях составления краткосрочного прогноза расходов воды в замыкающем створе какой-либо реки необходим долгосрочный прогноз объема половодья, т. е. должны быть известны интегральные значения всех членов, входящих в уравнение (11).

Исследования показали, что приток воды в ручейковую сеть может быть вычислен по двум схемам. Первая схема предусматривает, что весь приток воды, определенный по выражению (19), попадает непосредственно в речную сеть. Вторая схема, детально изложенная в работе [9], исходит из того, что в начальный период одна часть воды  $y_c$ , определяемая по формуле (19), сразу же попадает в первичную гидрографическую сеть, а другая часть аккумулируется под снежным покровом на поверхности бассейна. Аккумулируемая вода затем сбрасывается в гидрографическую сеть по определенной закономерности [3, 9].

Безусловно, вторая схема более полно отражает физику указанного процесса. Однако исходя из опыта рекомендуем для целей прогноза отдать предпочтение весьма простой первой схеме.

**1.1.5. Расчет добегания воды от места ее поступления в первичную гидрографическую сеть до замыкающего створа реки.** Производится с использованием функции влияния, которая аппроксимирована, согласно работе [7], двухпараметрическим распределением

$$R_{(T)} = \frac{1}{(n-1)! \tau_L} \left( \frac{t}{\tau_L} \right)^{n-1} e^{-t/\tau_L}, \quad (20)$$

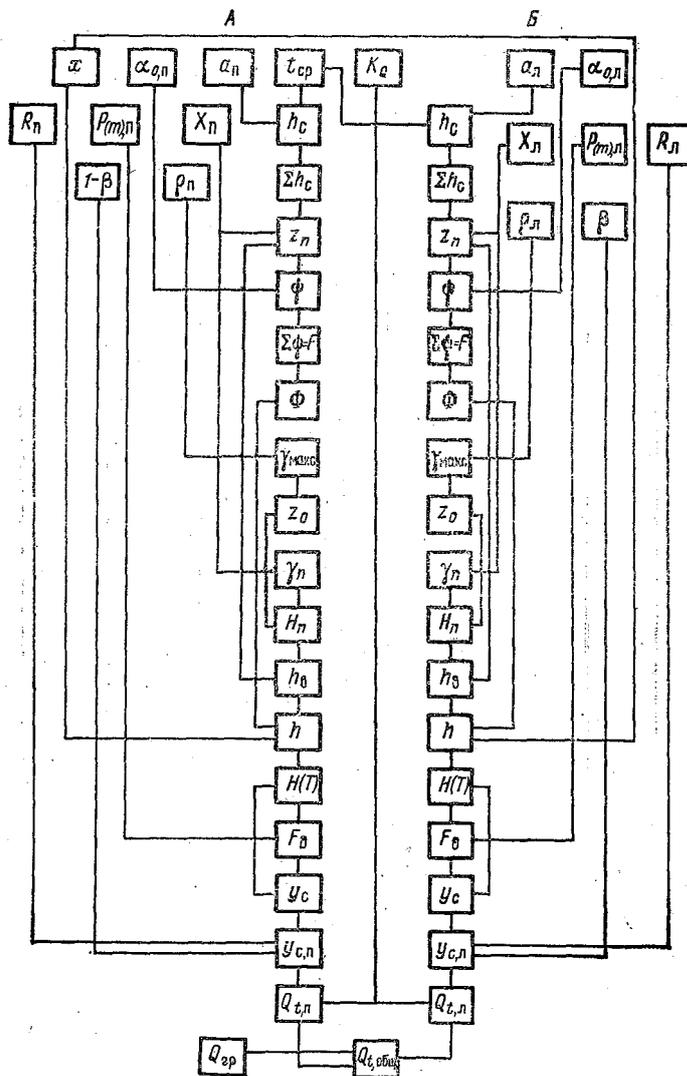


Рис. 2. Блок-схема расчета гидрографа весеннего стока для открытой (А) и лесной (Б) частей бассейна (полный вариант модели).

где  $n$  и  $\tau_L$  — параметры, характеризующие соответственно число расчетных участков и время добегания воды на каждом из них.

Для определения параметров  $n$  и  $\tau_L$  в разд. 1.2.3 настоящих Указаний предложено несколько способов.

С учетом изложенного расчет расходов воды, сформированных талым и подземным стоком, в замыкающем створе реки по обоим вариантам модели производится соответственно по уравнениям:

$$Q(t) = K_Q \left[ \int_0^t R_{п.у.с}(\tau) d\tau + \int_0^t R_{л.с}(\tau) d\tau \right] + Q_{гр}, \quad (21)$$

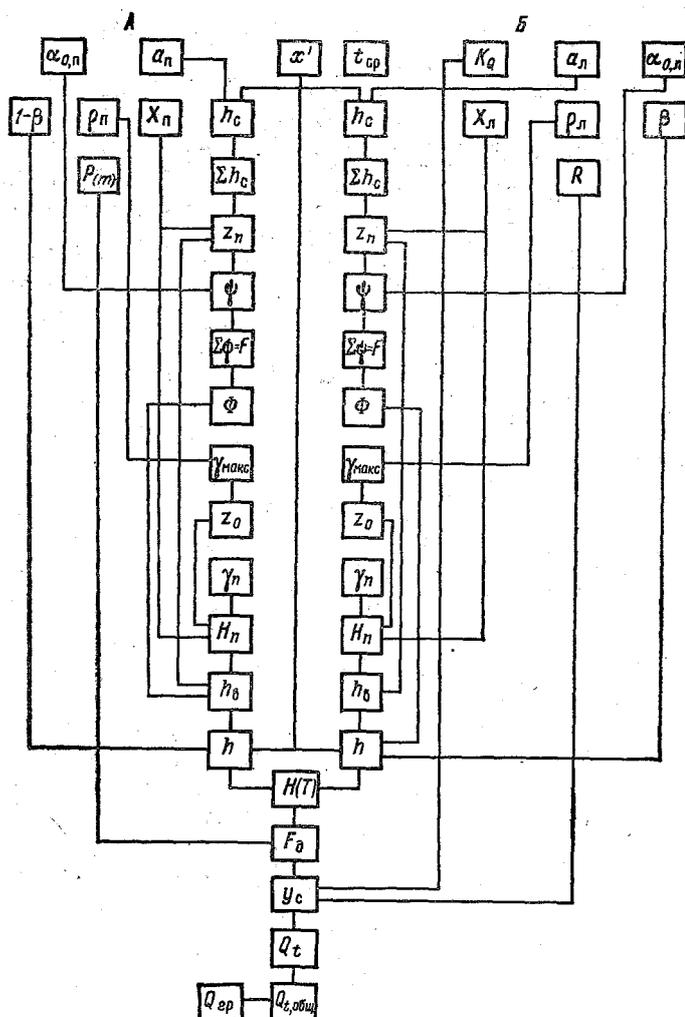


Рис. 3. Блок-схема расчета гидрографа весеннего стока для открытой (А) и лесной (Б) частей бассейна (неполный вариант модели).

$$Q(t) = K_Q \int_0^t R y_c(\tau) d\tau + Q_{гр}, \quad (22)$$

где  $K_Q$  — коэффициент размерности; индексы п и л показывают, что данные члены уравнений относятся к полевой и лесной частям бассейна;  $Q_{гр}$  — грунтовая составляющая, которая принимается равной расходу воды в замыкающем створе перед началом снеготаяния.

В конечном счете практические расчеты ежедневных расходов воды рек в период половодья для частично залесенных бассейнов по полному и неполному вариантам модели осуществляются в соответствии с блок-схемами, показанными на рис. 2 и 3. На рисунках видно, что для расчета элементов водного баланса для полевой и лесной частей бассейна используются одни и те же уравнения с применением лишь различных параметров.

## 1.2. Рекомендации по определению параметров и констант моделей

На блок-схемах, представленных на рис. 2 и 3, а также из уравнений (1) — (22) видно, что оба варианта моделей включают в себя пять основных параметров, причем при расчетах расходов воды рек по снеготаянию для частично залесенных бассейнов в моделях используются по пять аналогичных параметров для открытой и залесенной частей бассейна, включая

$a$  — коэффициент стаивания, мм/°С;  $C_{v,s}$  — коэффициент вариации, характеризующий распределение снежного покрова по территории;  $P_{(m)}$  — параметр, характеризующий потери талого стока за период половодья;  $n$  и  $\tau$  — параметры функции вливания, характеризующие неодновременность добегания воды от места ее поступления в ручейковую сеть до замыкающего створа реки.

Кроме того в моделях используются константы в виде коэффициентов лесистости  $\beta$  и открытой части бассейна  $(1-\beta)$ , значения которых выражаются в долях единицы; коэффициент размерности  $K_Q$  для перехода от слоя стока к расходам воды в замыкающих створах рек, а также запасы воды в снежном покрове  $x$  и плотность снежного покрова  $\rho$  к началу снеготаяния.

Некоторые из перечисленных параметров и констант являются постоянными для многолетнего периода, другие меняются ежегодно, т. е. характерны только для периода половодья одного года. К постоянным параметрам для многолетнего периода относятся: коэффициент стаивания; коэффициент лесистости; параметры, характеризующие кривые распределения снежного покрова (принимаются постоянными условно); коэффициент размерности и ординаты кривых добегания.

К ежегодно меняющимся параметрам относятся: запасы воды в снежном покрове к началу снеготаяния; плотность снега перед началом снеготаяния; параметр, характеризующий потери талого стока за весь период половодья.

Большинство из перечисленных параметров и констант легко определяется непосредственно из данных наблюдений или с использованием оптимизационных процедур. Поэтому в настоящих Указаниях остановимся лишь на тех параметрах, определение которых вызывает некоторые трудности.

**1.2.1. Коэффициенты стаивания.** Существует несколько способов для определения коэффициентов стаивания. С точки зрения авторов, основным из них следует признать способ, основанный на линейной связи между запасами воды в снеге перед началом снеготаяния  $x$  и суммой положительных значений средней суточной температуры воздуха за период снеготаяния  $\Sigma t$  °С [3, 8]. Имея указанные данные за предыдущие годы и исходя из соотношения  $X = a \Sigma t$ , легко можно получить значения коэффициентов стаивания  $a$  (мм/°С) отдельно для полевой и залесенной частей водосбора.

Рассмотрим определение этих коэффициентов на примере водосбора Горьковского водохранилища. По данным за 1968—1970 гг. о запасах воды в снежном покрове перед началом снеготаяния на полевых и лесных частях отдельных водосборов, а также о суммах положительных значений температуры воздуха за период снеготаяния построены зависимости (рис. 4). Они показывают, что связь между указанными факторами удовлетворительна при использовании осредненных данных по районам.

Согласно этим зависимостям, средние коэффициенты стаивания для полевых и лесных частей водосборов соответственно равны 3,6 и 1,3 мм/°С. При расчетах же снеготаяния за различные годы выяснилось, что эти коэффициенты несколько занижены.

В связи с этим пришлось их увеличивать методом последовательного приближения (подбора) до оптимальных значений. Для всего водосбора Горьковского водохранилища они оказались равными 4 мм/°С для полевых частей водосборов и 2 мм/°С для лесных.

Второй способ позволяет получить коэффициенты стаивания только для полевых частей бассейнов, пользуясь номограммой Шуляковского исходя из рекомендаций, изложенных в настоящих Указаниях, а также по данным табл. 1.

За последнее время в Гидрометцентре СССР начал применяться третий способ, позволяющий определять эти коэффициенты с использованием оптимизационных процедур на ЭВМ. Опыт показал, что для районов Европейской территории СССР (к северу от 55° с. ш.) средние коэффициенты стаивания снежного покрова в лесу обычно колеблются в пределах 1,8—3,0 мм/°С, а в поле они меняются

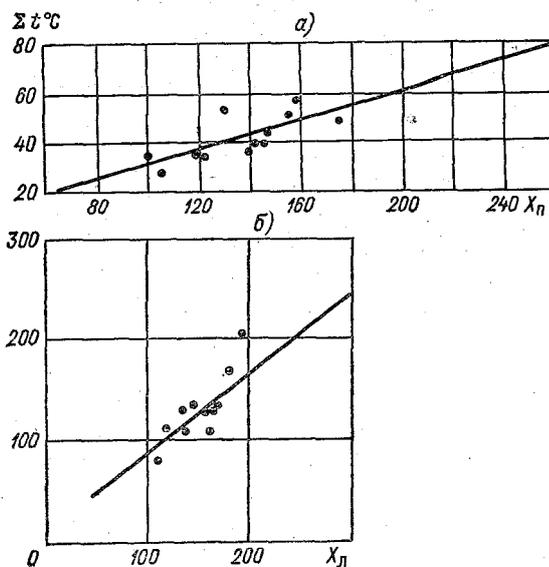


Рис. 4. Связь суммы положительных значений температуры воздуха за период снеготаяния и максимальных снегов запасов для полевой  $X_{п}$  (а) и лесной  $X_{л}$  (б) частей Горьковского водохранилища.

Точки — средние значения  $\Sigma t$  °С,  $X_{п}$  и  $X_{л}$  каждого района.

от 4,0 до 5,0 мм/°С. Так, например, при разработке методов прогноза притока воды в каскад волжско-камских водохранилищ получены положительные результаты при использовании коэффициентов  $a_{п} = 2,0...2,4$ ;  $a_{л} = 4,0...4,4$  мм/°С.

**1.2.2. Коэффициенты вариации кривых распределения снежного покрова.** Формула (16) показывает, что вид кривой распределения в основном зависит от величины  $a_0$ , которая, в свою очередь, определяется значением коэффициента вариации. Согласно исследованиям, значения коэффициентов вариации изменяются как в пространстве, так и во времени (от года к году).

Пространственная изменчивость коэффициентов вариации обуславливается главным образом неоднородностью постоянных физико-географических характеристик различных бассейнов, к числу которых следует отнести размеры бассейнов, их залесенность, густоту овражно-балочной сети, площади, занятые повышениями и понижениями, и т. д.

Временная изменчивость обуславливается в основном климатическими факторами: неравномерностью залегания снежного покрова по территории бассейна, распределением жидких осадков, выпадающих в период половодья, влиянием ветрового и температурного режима в период формирования снежного покрова и т. д.

Обычно при расчетах для целей гидрологических прогнозов учитывается только пространственная изменчивость коэффициентов вариации. Значения коэффициентов получают по данным стандартных наблюдений за многолетний период и принимают постоянными. При отсутствии данных о распределении снежного покрова по территории бассейна в первом приближении можно использовать обобщенные коэффициенты, полученные В. Д. Комаровым [8], а также предложения, сделанные авторами работы [3]. В частности, для многих рек бассейнов волжских водохранилищ ими были использованы для полевой и лесной частей бассейнов коэффициенты  $C_{v,п} = 0,38...0,45$ ,  $C_{v,л} = 0,35...0,40$ .

Таблица 1

Изменчивость коэффициентов стаивания во времени и по различным районам Европейской территории СССР по номограммам Л. Г. Шуляковского, мм/°С

Дата	Волгоград	Днепропетровск	Белгород	Елец	Курск	Нижне-девичья стовокая станция	Орел	Москва	Мелекес	Кинешма	Средний коэффициент по 10 пунктам
20 II	3,3	3,2	3,1	2,8	3,1	3,2	3,2	2,8	2,8	2,8	3,0
28 II	3,5	3,5	3,4	3,1	3,4	3,5	3,5	3,0	3,1	3,1	3,3
10 III	3,8	3,8	3,7	3,5	3,8	3,8	3,8	3,4	3,5	3,5	3,7
20 III	4,0	4,1	4,0	3,9	4,2	4,1	4,2	3,8	3,8	3,8	4,0
31 III	4,3	4,4	4,4	4,2	4,6	4,4	4,5	4,2	4,2	4,2	4,3
10 IV	4,5	4,6	4,8	4,6	4,9	4,8	4,8	4,5	4,6	4,6	4,7
20 IV	4,8	4,9	5,1	5,0	5,3	5,1	5,2	4,9	5,0	5,0	5,0
30 IV	5,0	5,2	5,4	5,3	5,6	5,2	5,3	5,3	5,4	5,4	5,4
10 V	5,2	5,4	5,7	5,7	5,9	5,8	5,8	5,6	5,8	5,8	5,7
20 V	5,5	5,7	6,0	6,0	6,3	6,2	6,1	6,0	6,2	6,2	6,0
31 V	5,8	6,0	6,4	6,4	6,6	6,5	6,5	6,4	6,6	6,6	6,4

Следует подчеркнуть, что задача определения коэффициентов вариации для рассматриваемых целей, а также влияния их значений на рассчитанный ход снеготаяния разработана еще недостаточно. Этот вопрос заслуживает специальных исследований.

Здесь можем отметить лишь следующее:

— значения коэффициентов вариации для большинства бассейнов лесной, лесостепной и степной зон Европейской территории СССР находятся в пределах 0,3—0,6;

— значения  $C_v < 0,4$  оказывают очень большое влияние на рассчитанный ход снеготаяния. Особая чувствительность результатов расчетов к принятому  $C_v$  проявляется при его значениях меньше 0,35; при этих значениях снижение  $C_v$  даже на 0,01 приводит при расчете к неоправданному скачкообразному сходу снежного покрова из-за пологой части кривой распределения снега, в которой небольшому приращению факторов снеготаяния соответствует заметное изменение процента покрытости.

При отсутствии данных наблюдений коэффициент вариации рекомендуется определять и затем уточнять методом подбора, суть которого сводится к следующему.

Известно, что при расчете снеготаяния по коэффициентам стаивания интенсивность освобождения площади бассейна от снежного покрова зависит от значений коэффициентов стаивания и вариации кривой распределения снежного покрова, а также от хода положительной температуры воздуха.

Коэффициенты стаивания с удовлетворительной точностью можно определить по материалам прошлых лет, исходя из зависимостей вида  $X = a \Sigma t$ .

Далее, зная ход температуры воздуха, значение коэффициента стаивания и приближенное значение коэффициента вариации, производим расчеты снеготаяния до тех пор, пока рассчитанные даты схода снежного покрова не совпадут за ряд лет с наблюдаемыми. Можно полагать, что при таком совпадении средний многолетний коэффициент вариации кривой распределения снежного покрова по площади бассейна подобран с удовлетворительной точностью.

**1.2.3. Параметры кривых добегаания.** Рассчитанные значения водоотдачи раздельно с полевой и лесной частей бассейна трансформируются в гидрографы в замыкающих створах с помощью двухпараметрической функции влияния, описанной уравнением (20). Определение параметров функций влияния (кривых добегаания)  $n$  и  $t$  производится несколькими методами [1, 2].

В последние годы широкое применение нашли методы оптимизации парамет-

ров [1, 2], из которых основным следует признать метод, описанный в работе [2].

В Гидрометцентре СССР оптимизация параметров кривой добегаания этим методом ведется по программам, разработанным для нескольких ЭВМ, включая М-222, БЭСМ-6, ЕС-40.

Программой предусматривается определение  $n$  и  $\tau$  по стандартным данным от одного до трех входов гидрографов с применением критерия качества и при условии соблюдения равенства объемов воды на входах и выходе. Критерий качества вычисляется по следующему уравнению:

$$K = \sum_{j=1}^N \int_0^{T_j} [Q_{\Phi_i}(\tau) - Q_{P_i}(\tau, \eta_i)]^2 f(Q_{\Phi_i}) d\tau, \quad (23)$$

где  $Q_{\Phi_i}$  и  $Q_{P_i}$  — фактические и рассчитанные ординаты  $j$ -того гидрографа;  $T_j$  — продолжительность  $j$ -того гидрографа;  $\eta_i$  — вектор параметров;  $N$  — число гидрографов, включенных в оптимизацию.

Алгоритм программы состоит из шести блоков, включая следующие процедуры:

- вычисление расхода воды в замыкающем створе и расчет критерия качества;
- вычисление гамма-функции;
- вычисление интеграла Дюамеля;
- оптимизация параметров модели;
- изменение значений оптимизируемых параметров;
- печать оптимизируемых параметров.

В программе используются стандартные подпрограммы: ввод исходных данных, печать результатов счета и печать графиков. Описываемая программа достаточно универсальна. Она используется не только для оптимизации параметров кривых добегаания, но и для расчета гидрографов по известным параметрам этих кривых. Программой предусмотрена выдача на печать критерия качества фактических и рассчитанных расходов воды в замыкающем створе, значений оптимизируемых параметров, меток окончания оптимизации, совмещенных графиков рассчитанных и фактических гидрографов.

Опыт показывает, что для оптимизации параметров кривых добегаания талого стока (весеннего половодья) для каждого бассейна необходима информация о входных и выходных значениях за 3—5 лет. В рассматриваемом случае в качестве входных данных служат средняя взвешенная водоотдача бассейна в период снеготаяния или значения водоотдачи отдельно для поля и леса, а в качестве выходных — гидрограф талого стока в замыкающем створе реки.

Для оптимизации параметров следует задать их верхние и нижние граничные значения, что делается практически произвольно. Однако при этом следует учитывать размеры бассейна и ориентировочное общее время добегаания от места поступления воды в ручейковую сеть до замыкающего створа реки.

Так, например, при расчетах талого стока для 32 частных водосборов, расположенных в бассейне Волги, с площадями от 1,2 до 27 тыс. км<sup>2</sup> параметр  $n$  изменялся от 0,2 до 10, а  $\tau_L$  — от 0,3 до 2,5 сут [3—5]. Причем в пределах этих значений прослеживается прямая связь между площадями бассейнов и параметром  $n$ : с увеличением площади бассейнов, как правило, растет значение  $n$ .

Второй метод оптимизации параметров  $n$  и  $\tau$  (вспомогательный) описан в работе [1]. Он предусматривает определение этих параметров отдельно для поля и леса при одном выходном гидрографе в замыкающем створе реки.

Расчет кривых добегаания  $R_n(\tau)$  и  $R_L(\tau)$  производится исходя из принципа суперпозиции, т. е. каждая кривая определяется независимо одна от другой.

Параметры кривых  $n_n$ ,  $n_L$  и  $\tau_n$ ,  $\tau_L$  определяются по минимуму интеграла абсолютной ошибки рассчитанного гидрографа:

$$K = \int_0^T |Q_{\Phi} - Q_P| dt, \quad (24)$$

где  $Q_{\Phi}$  и  $Q_P$  — фактические и рассчитанные расходы воды в замыкающем створе малой реки.

По найденным параметрам  $n$  и  $\tau$  ординаты кривых добегаания определяются

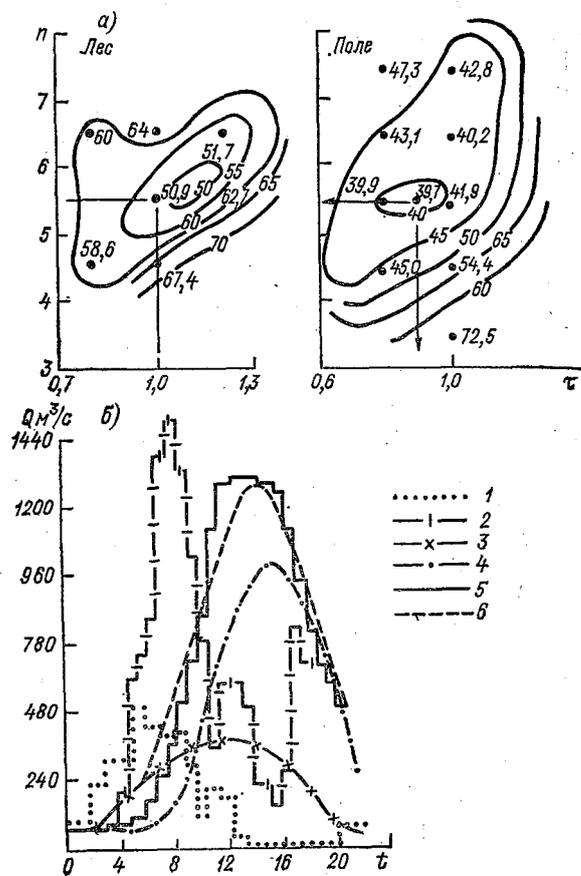


Рис. 5. Вычисление оптимальных значений параметров для лесной и открытой частей бассейна (а) и пример расчета для бассейна р. Костромы у Буя (1957 г.) (б).

1 — водоотдача с полевой части бассейна; 2 — водоотдача с лесной части; 3 — гидрограф стока с полевой части бассейна; 4 — гидрограф стока с лесной части; 5 — фактические расходы воды в замыкающем створе; 6 — рассчитанные расходы. Цифры у точек — значения критерия оптимизации.

как реакция системы на единичный импульс (единичный гидрограф), подаваемый последовательно на каждый вход.

Определение параметров  $n$  и  $\tau$ , а также ординат кривых добегания  $R_n(\tau)$  и  $R_n(\tau)$  предусмотрено на ЭВМ МИР-2. Порядок определения параметров, а затем ординат кривых добегания состоит в следующем. Вначале определяются кривые добегания для полевой части бассейна исходя из положения о том, что сток от таяния снега в поле формирует фазу подъема гидрографа  $Q(t)$  в замыкающем створе, где  $dQ/dt > 0$ .

Параметры  $n_n$  и  $\tau_n$  определяются исходя из верхнего предела интегрирования  $T$  в выражении (24). Значения  $T$  принимаются по количеству суток от начала до конца снеготаяния в поле  $T_n$ . При

$$T_n < 12 \text{ сут} \quad T = T_n - 2, \text{ а при } T_n > 12 \text{ сут} \quad T = T_n - 4.$$

Процедура определения параметров  $n_n$  и  $\tau_n$  соответствовала методу, изложенному в работе [1]. График для определения  $n_{n, \text{opt}}$  и  $\tau_{n, \text{opt}}$ , значения которых соответствуют  $K_{\text{мин}}$ , показан на рис. 5 а.

После определения параметров  $n_n$  и  $\tau_n$  определяются параметры  $n_d$  и  $\tau_d$  кривой добегаания с залесенных участков бассейна для второго входа  $y_d(t)$ . Вначале принимается, что  $n_d = n_{n, \text{opt}} = \text{const}$  и  $\tau_d = \tau_{n, \text{opt}} = \text{const}$ , тогда значение  $y_d(t) \neq 0$ .

Способ определения оптимальных значений параметров  $n_{d, \text{opt}}$  и  $\tau_{d, \text{opt}}$ , соответствующих минимальному значению ошибки вычисления гидрографа, аналогичен описанному способу определения  $n_{n, \text{opt}}$  и  $\tau_{n, \text{opt}}$ . Вычисление интегральной ошибки при этом ведется за весь период половодья в замыкающем створе.

Определение оптимальных значений  $n$  и  $\tau$  для полевой и лесной зон бассейна, при минимальной ошибке рассчитанного гидрографа, производится вначале для двух лет, различающихся характером половодья. Если параметры и ординаты кривых добегаания за два года мало различаются между собой, то для практического использования принимаются средние (из двух) значения ординат соответствующих кривых. Если расхождения существенные, тогда определяются параметры и ординаты двух кривых добегаания для третьего года и вновь сопоставляются между собой. При сходимости результатов по двум (из трех) годам принимаются средние значения из двух годов. Если по трем годам не удается найти совпадения значений, то поиск ведется для четвертого года и затем принимаются средние значения из всех четырех.

**1.2.4. Параметр, характеризующий потери.** Как уже было указано ранее, параметр  $P_{(m)}$  характеризует суммарные потери талых и дождевых вод за период снеготаяния. При этом допускается, что он учитывает общие потери воды, идущие на испарение со снега и освободившейся от снежного покрова поверхности бассейна в период снеготаяния, на заполнение поверхностной емкости водосбора и просачивание. Этот параметр определяется, исходя из интегрального уравнения стока (18), по суммарной подаче воды на поверхность бассейна и объему стока. Таким образом, при обработке схемы расчета гидрографа половодья на основе модели определение параметра  $P_{(m)}$  производится по фактическим данным о запасах воды в снежном покрове к началу снеготаяния за прошедшие годы, сумме жидких осадков за период снеготаяния и стоку воды в замыкающем створе реки. При прогнозе гидрографа половодья  $P_{(m)}$  определяется с учетом прогностических водно-балансовых связей, т. е. долгосрочного прогноза объема половодья.

Опыт показывает, что для различных частных водосборов бассейна Волги параметр  $P_{(m)}$  изменяется довольно в широких пределах. В зависимости от состояния увлажненности бассейна, промерзания почв и других факторов этот параметр может меняться от нескольких единиц (при незначительных потерях) до нескольких сотен (при больших потерях).

### 1.3. Влияние изменчивости параметров модели на расчеты (прогнозы) гидрографа половодья

Из предыдущих разделов настоящих Указаний становится ясным, что при разработке методов прогнозов (расчетов) весеннего половодья для конкретных речных бассейнов на основе моделей весьма важным этапом является определение параметров этих моделей, а также установление их начальных и экстремальных значений. К этому следует добавить, что для указанных целей представляет также большой интерес оценка влияния изменчивости параметров модели на результаты расчета (прогноза) гидрографа половодья.

В настоящих Указаниях приводятся подходы к оценке влияния изменчивости основных параметров модели, а также примеры анализа конечных результатов расчетов гидрографов стока рек применительно к двум частным бассейнам. В качестве примеров выбраны водосборы Углицкого и одного из районов Рыбинского водохранилища. Оценка сделана на основе стандартных исходных данных. Излагаемые здесь выводы и рекомендации по данному вопросу следует учитывать при разработке методов краткосрочных прогнозов весеннего половодья. В то же время следует подчеркнуть, что без дополнительных проработок они могут быть распространены лишь на водосборы, подобные рассматриваемым.

**1.3.1. Краткая характеристика бассейнов, для которых оценивается влияние параметров.** Первый бассейн является частью водосбора Рыбинского водохрани-

лица и занимает площадь почти 20 тыс. км<sup>2</sup>. В работе [4] эта площадь относится к первому району и охватывает территорию, непосредственно прилегающую к акватории водохранилища. Этот район почти наполовину залесен, коэффициент лесистости составляет 0,54. По территории района протекает довольно много небольших рек с площадями водосборов 1—3 тыс. км<sup>2</sup>. В связи с этим роль регулирующей емкости речной сети невелика и талая вода, поступающая в речную сеть, обычно сбрасывается быстро, в течение 1—3 сут. Поэтому здесь наблюдается резкий подъем и спад волны половодья. Суточная интенсивность роста значений суммарного стока с этого района достигает иногда 400—500 м<sup>3</sup>/с, что в 3—4 раза превышает интенсивность приращения стока с соседнего бассейна р. Мологи, площадь которого одинакова с площадью рассматриваемого. К началу снеготаяния на бассейне запасы воды в снежном покрове в среднем составляют почти 140 мм, причем в западной части снега накапливается на 15—30 мм меньше, чем в восточной. С учетом жидких осадков в среднем накапливается 120 мм воды. С учетом этого и жидких осадков до конца снеготаяния на поверхность бассейна поступает слой воды около 170 мм. Потери талой воды здесь обычно невелики, средний коэффициент стока за половодье составляет 0,88.

Второй частный бассейн представляет собой водосбор Угличского водохранилища, с которого осуществляется незарегулированный приток. По своим размерам он почти равен вышеописанному и занимает площадь 19,2 тыс. км<sup>2</sup>. Бассейн залесен на одну треть, коэффициент лесистости равен 0,35. К началу снеготаяния здесь в снежном покрове в среднем накапливается 120 мм воды. С учетом этого и жидких осадков до конца снеготаяния на поверхность бассейна поступает слой воды около 150 мм. Потери воды в период половодья здесь больше по сравнению с потерями описанного выше района Рыбинского водохранилища.

Средний коэффициент стока за половодье для многолетнего периода составляет 0,63. Для обоих районов оценка сделана по пятилетним данным (табл. 2).

Таблица 2

Средние значения составляющих водного баланса за половодье для двух районов бассейна Верхней Волги, мм

год	Первый район Рыбинского водохранилища				Бассейн Угличского водохранилища			
	запас воды в снежном покрове к началу снеготаяния	жидкие осадки за период снеготаяния	сток за половодье без учета дождей после схода снежного покрова в лесу	коэффициент	запас воды в снежном покрове к началу снеготаяния	жидкие осадки за период снеготаяния	сток за половодье без учета дождей после схода снежного покрова в лесу	коэффициент стока
1932	169	14	181	0,99	130	14	91	0,63
1963	105	2	92	0,86	88	3	66	0,73
1964	128	17	110	0,76	118	14	46	0,35
1965	143	2	136	0,94	140	22	52	0,32
1969	130	14	107	0,74	118	24	55	0,39
Среднее за 1951—1973 гг.	138	34	151	0,88	120	30	95	0,63

При сравнении годовых запасов воды в снежном покрове (табл. 2) со средним видно, что в двух случаях они выше, а в трех ниже многолетних. Приведенные в таблице годы выбраны главным образом по принципу минимального количества жидких осадков в период снеготаяния. Допускалось, что при указанных условиях меньше искажается естественный ход снеготаяния.

1.3.2. Методика оценки влияния изменчивости параметров на результаты расчетов гидрографа. При решении поставленной задачи авторы исходили из того, что количественная оценка влияния изменчивости параметров на конечные результаты расчетов может быть сделана только приближенно. Такое исходное положение обусловлено в основном следующими причинами:

— данные стандартных наблюдений и методы определения параметров, используемые в настоящей работе, не позволяют вычислить значения параметров с высокой точностью;

— все рассматриваемые параметры модели ( $a$ ,  $C_0$ ,  $P_{(m)}$ ,  $n$  и  $\tau$ ) являются многофакторными и большинство из них взаимосвязаны между собой, что не позволяет выявить их влияние на конечные результаты.

Решение поставленной задачи осуществлялось методом сопоставления гидрографов, рассчитанных при разных параметрах, с фактическими. За критерий качества совпадения рассчитанных ( $Q_p$ ) и фактических ( $Q_f$ ) расходов воды приняты значения средних квадратических отклонений  $\bar{S}$ , вычисленных по выражению

$$S = \sqrt{\frac{\sum_1^n (Q_f - Q_p)^2}{n - 1}}, \quad (25)$$

где  $n$  — продолжительность половодья, сут.

Для оценки результатов по упрощенному варианту модели были проведены расчеты гидрографа по каждому из двух районов для пяти лет, указанных в табл. 2, при различных сочетаниях параметров, изменявшихся в следующих диапазонах:

— коэффициенты стаявания для поля от 3,5 до 7,0, для леса от 1,0 до 4,0 мм/°С;

— коэффициенты вариации  $C_0$  кривой распределения снежного покрова для поля от 0,36 до 0,45, для леса от 0,35 до 0,42;

— параметр  $P_{(m)}$ , характеризующий водопоглотительную способность бассейна, от  $\pm 100$  до  $-50$  % фактического значения для каждого года из пяти лет;

— коэффициент лесистости в пределах  $\pm 15$  % фактического значения.

Расчеты делались по сериям, в каждой из которых изменялся лишь один параметр, а остальные оставались постоянными. Это позволяло определять их влияние на результаты расчетов.

Первоначально остановимся на оценке влияния коэффициентов стаявания. Для интересующих нас целей были произведены расчеты гидрографов весеннего половодья по 20 вариантам для первого района Рыбинского водохранилища и по 12 вариантам для Угличского водохранилища. Расчеты для каждого водохранилища сделаны по данным одних и тех же пяти лет (табл. 3) с использованием различных сочетаний коэффициентов стаявания. Таким образом, в общей сложности для оценки результатов было рассчитано 160 гидрографов. Сопоставление рассчитанных гидрографов с фактическими, а также анализ значений средних квадратических отклонений  $\bar{S}$  показали, что в большинстве случаев прослеживается определенная закономерность заключающаяся в том, что при заметном изменении коэффициентов стаявания по сравнению с оптимальными происходит увеличение ошибок расчета гидрографа. За оптимальные коэффициенты стаявания для рассматриваемых водохранилищ приняты  $a_n = 4,4$  и  $a_n = 2,4$  мм/°С. Указанная закономерность особенно заметна при рассмотрении осредненных показателей результатов расчетов по 5-летним периодам, представленным в табл. 3.

По данным этой таблицы построены графики, иллюстрирующие ход значений  $\bar{S}$  в зависимости от изменений коэффициентов стаявания (рис. 6 и 7). На рис. 6 показаны результаты расчетов, полученные для обоих водохранилищ при 12 сочетаниях коэффициентов стаявания, на рис. 7 — при 20 сочетаниях коэффициентов по одному лишь Рыбинскому водохранилищу.

Анализ данных табл. 3 и рис. 6 и 7 позволяет высказать следующие соображения:

1) при завышении или занижении одного или обоих коэффициентов стаявания для частично залесенного бассейна по сравнению с их оптимальными значениями увеличиваются ошибки расчета гидрографа половодья. Это объясняется тем, что при завышении или занижении коэффициентов ход рассчитанного снеготаяния искусственно ускоряется или замедляется, соответственно он опережает или отстает от реальных процессов снеготаяния, происходящих на бассейнах. Это, в свою очередь, приводит к несовпадению формы и сроков рассчитанных гидрографов по сравнению с фактическими, а следовательно и к увеличению значений  $\bar{S}$ ;

Таблица 3

Значения коэффициентов стаивания ( $\text{мм}/^\circ\text{C}$ ), при которых произведены расчеты гидрографов, и показатели результатов расчетов

№ п/п	$a_n$	$a_l$	$\bar{S}$ м <sup>3</sup> /с		$\bar{S}/\bar{S}_2$ %	
			Рыбинское вдхр (1-район)	Угличское вдхр	Рыбинское вдхр (1-район)	Угличское вдхр
1	4,4	1,0	467	164	188	125
2	4,4	2,4	248	131	100	100
3	4,4	2,6	250	135	101	103
4	4,4	2,8	255	140	103	107
5	4,4	3,0	264	145	106	111
6	4,4	3,5	295	164	119	125
7	4,4	4,0	340	174	138	133
8	3,5	2,4	260	141	105	108
9	4,8	2,4	249	135	100	103
10	5,0	2,4	248	138	100	105
11	6,5	2,4	278	174	112	133
12	7,0	2,4	291	188	118	144
13	4,8	2,0	288	—	116	—
14	4,8	2,6	252	—	102	—
15	4,8	2,8	252	—	104	—
16	4,8	3,0	270	—	109	—
17	5,0	1,8	268	—	108	—
18	5,0	2,6	251	—	101	—
19	5,0	2,8	259	—	104	—
20	5,0	3,0	271	—	109	—

Примечания: 1) Результаты расчетов, полученные при коэффициентах стаивания  $a_n = 4,4$  и  $a_l = 2,4$  мм/ $^\circ\text{C}$  признаны наилучшими, поэтому сравнение остальных результатов производилось по отношению к указанным.

2)  $\bar{S}$  — вычислены по выражению (25) как средние за 5 лет (1962—1965, 1969 гг.).

2) при завышении или занижении одного из коэффициентов (для поля или леса) по сравнению с оптимальными, изменение ошибок расчета гидрографа происходит по закономерности, описываемой практически симметричной кривой параболического вида, у которой минимум соответствует ошибкам расчета, полученным при оптимальных коэффициентах (см. рис. 6 и 7);

3) около минимума ошибок имеется зона, внутри которой изменения коэффициентов стаивания практически не оказывают влияния на результаты расчета. Например, для Рыбинского водохранилища (см. рис. 7) эта зона лежит в пределах изменения коэффициентов для поля от 4,2 до 5,0 мм/ $^\circ\text{C}$ , для леса от 2,2 до 2,6 мм/ $^\circ\text{C}$ ;

4) равное изменение коэффициентов стаивания для поля и леса приводит к неодинаковому увеличению ошибок расчета гидрографа.

Обычно одни и те же изменения коэффициента для леса оказывают более заметное влияние на точность расчета по сравнению с изменениями полевого коэффициента (см. рис. 6 и 7).

Для выявления влияния изменения параметра  $P_{(m)}$  на точность расчета были произведены вычисления 50 гидрографов. При этом, как было указано выше, параметр  $P_{(m)}$  изменялся от  $-50$  до  $+100$  %. Результаты расчетов для двух водохранилищ приведены в табл. 4 и 5.

Анализ данных этих таблиц показывает:

1) увеличение или уменьшение параметра  $P_{(m)}$  на одно и то же значение по сравнению с фактическим приводит к неодинаковым изменениям ошибок расчета гидрографа половодья. Так, в пределах исследуемых изменений  $P_{(m)}$  его увеличе-

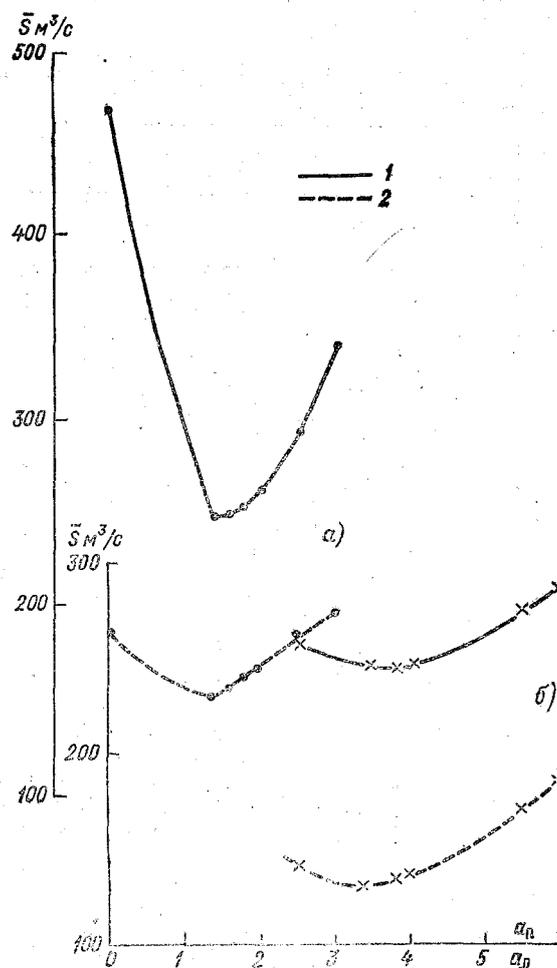


Рис. 6. Зависимость средних квадратических отклонений рассчитанных расходов от фактических ( $\bar{S}$ ) от значений коэффициентов ставания  $a_n$  (а) и  $a_n$  (б).

1 — Рыбинское водохранилище, 2 — Угличское водохранилище.

ние, как правило, слабее сказывается на ошибках расчета по сравнению с теми случаями, когда параметр  $P_{(m)}$  уменьшается;

2) обычно при увеличении параметра в пределах 20 % точность расчета гидрографа остается той же или даже повышается до 5 % по сравнению со случаем, когда в расчетах используется фактическое значение  $P_{(m)}$ .

Вышеизложенное, с точки зрения авторов, можно объяснить следующим. При увеличении параметра  $P_{(m)}$  (в пределах 20 %) рассчитанный суммарный сток за период половодья, как правило, на 5—10 % меньше фактического. При таком условии рассчитанный гидрограф обычно целиком вписывается в фактический и имеет лучшее с ним совпадение по сравнению со всеми другими случаями. Наоборот, при уменьшении параметра рассчитанный суммарный сток за половодье превышает фактический, что обуславливает увеличение ошибок в расчетах расхо-

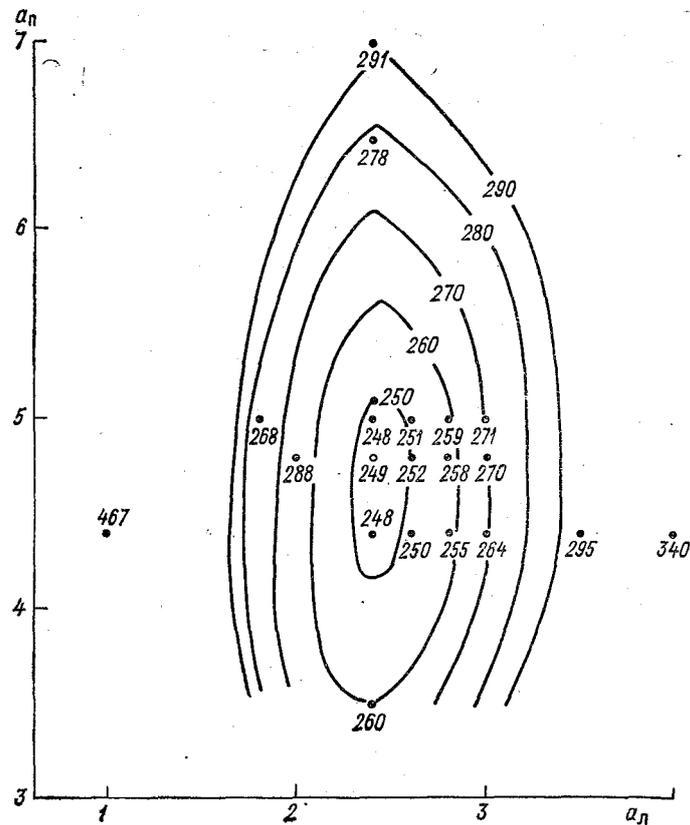


Рис. 7. Изолинии средних квадратических отклонений рассчитанных расходов от фактических ( $\Delta$ ) при различных коэффициентах сглаживания ( $a_n$  и  $a_l$ ) для первого района Рыбинского водохранилища.

дов воды за отдельные сутки, а следовательно, и понижение точности расчета гидрографа.

Здесь следует подчеркнуть, что на рассматриваемые результаты расчетов в определенной степени влияют некоторые слабые стороны самой модели, что отмечалось в работе [4].

Анализируя полученные результаты расчетов гидрографов половодья при различных параметрах  $P_{(m)}$ , можно сделать вывод, суть которого заключается в следующем. Известно, что при применении рассматриваемой модели для выпуска краткосрочных прогнозов гидрографа весеннего стока параметр  $P_{(m)}$ , как правило, определяется исходя из долгосрочного прогноза объема стока половодья. Обычно ошибки такого прогноза лежат в пределах  $\pm 20\%$ , хотя в отдельные годы они составляют 30—40 %.

Из этих условий и полученных авторами результатов следует, что долгосрочный прогноз объема стока с положительными ошибками при прочих равных условиях должен влиять практически всегда меньше на понижение точности прогноза гидрографа половодья по сравнению со случаями, когда знак ошибки долгосрочного прогноза противоположен указанному.

В заключение рассмотрим влияние коэффициентов вариации распределения снежного покрова  $C_v$  и лесистости  $\beta$  на ошибки расчета гидрографа. Для выяснения этого вопроса были произведены расчеты гидрографа притока воды в оба водохранилища при различных значениях  $C_v$  и  $\beta$  (табл. 6).

Таблица 4

Значения параметра  $P_m$ , при которых произведены расчеты гидрографов, и показатели точности результатов расчетов  $y$  и  $\bar{S}$

Год	Характеристика	Фактическое значение	Значения при изменении $P_m$ на				
			+20 %	-20 %	+50 %	-50 %	+100 %
1962	$P_m$	$\frac{66}{5}$	$\frac{79}{6}$	$\frac{53}{4}$	$\frac{99}{8}$	$\frac{33}{2}$	$\frac{132}{10}$
	$y$	$\frac{86}{175}$	$\frac{78}{173}$	$\frac{94}{174}$	$\frac{69}{171}$	$\frac{104}{177}$	$\frac{56}{169}$
	$\bar{S}$	$\frac{143}{270}$	$\frac{132}{263}$	$\frac{181}{278}$	$\frac{149}{250}$	$\frac{288}{294}$	$\frac{204}{258}$
1963	$P_m$	$\frac{25}{17}$	$\frac{30}{20}$	$\frac{20}{14}$	$\frac{37}{25}$	$\frac{12}{9}$	$\frac{50}{34}$
	$y$	$\frac{67}{90}$	$\frac{63}{87}$	$\frac{71}{93}$	$\frac{57}{82}$	$\frac{79}{98}$	$\frac{49}{74}$
	$\bar{S}$	$\frac{178}{290}$	$\frac{147}{274}$	$\frac{201}{310}$	$\frac{128}{263}$	$\frac{263}{356}$	$\frac{129}{277}$
1964	$P_m$	$\frac{143}{45}$	$\frac{172}{54}$	$\frac{114}{36}$	$\frac{214}{67}$	$\frac{72}{23}$	$\frac{286}{90}$
	$y$	$\frac{45}{101}$	$\frac{41}{94}$	$\frac{52}{109}$	$\frac{37}{82}$	$\frac{69}{121}$	$\frac{25}{73}$
	$\bar{S}$	$\frac{90}{250}$	$\frac{84}{244}$	$\frac{130}{270}$	$\frac{88}{258}$	$\frac{260}{331}$	$\frac{147}{304}$
1965	$P_m$	$\frac{193}{17}$	$\frac{232}{20}$	$\frac{154}{14}$	$\frac{289}{25}$	$\frac{96}{9}$	$\frac{396}{34}$
	$y$	$\frac{52}{128}$	$\frac{46}{123}$	$\frac{62}{129}$	$\frac{38}{118}$	$\frac{84}{134}$	$\frac{29}{109}$
	$\bar{S}$	$\frac{100}{225}$	$\frac{110}{235}$	$\frac{125}{219}$	$\frac{139}{261}$	$\frac{252}{222}$	$\frac{188}{323}$
1969	$P_m$	$\frac{136}{41}$	$\frac{163}{49}$	$\frac{109}{33}$	$\frac{204}{61}$	$\frac{68}{21}$	$\frac{272}{82}$
	$y$	$\frac{54}{105}$	$\frac{47}{99}$	$\frac{63}{113}$	$\frac{40}{90}$	$\frac{82}{125}$	$\frac{32}{78}$
	$\bar{S}$	$\frac{141}{206}$	$\frac{139}{195}$	$\frac{168}{216}$	$\frac{166}{221}$	$\frac{282}{253}$	$\frac{193}{391}$

Примечания: 1.  $y$  — суммарный сток за период половодья, мм;  $\bar{S}$  — средние квадратические отклонения, м<sup>3</sup>/с.

2. В числителе — значения характеристик по Угличскому водохранилищу, в знаменателе — по первому району Рыбинского водохранилища.

Таблица 5

Влияние изменения параметра  $P_m$  на показатели точности результатов расчетов  $y$  и  $\bar{S}$ , % фактических значений

Год	Характеристика	$P_{(m)} \%$				
		120	80	150	50	200
1962	$y$	$\frac{91}{99}$	$\frac{109}{100}$	$\frac{80}{98}$	$\frac{121}{101}$	$\frac{65}{96}$
	$\bar{S}$	$\frac{92}{97}$	$\frac{127}{103}$	$\frac{104}{93}$	$\frac{201}{109}$	$\frac{143}{96}$
1963	$y$	$\frac{94}{97}$	$\frac{106}{103}$	$\frac{85}{91}$	$\frac{118}{109}$	$\frac{73}{82}$
	$\bar{S}$	$\frac{83}{94}$	$\frac{113}{107}$	$\frac{72}{91}$	$\frac{148}{123}$	$\frac{73}{96}$
1964	$y$	$\frac{91}{93}$	$\frac{116}{108}$	$\frac{82}{81}$	$\frac{153}{120}$	$\frac{56}{72}$
	$\bar{S}$	$\frac{93}{98}$	$\frac{144}{108}$	$\frac{98}{103}$	$\frac{289}{132}$	$\frac{163}{111}$
1965	$y$	$\frac{88}{96}$	$\frac{119}{100}$	$\frac{73}{92}$	$\frac{162}{105}$	$\frac{56}{92}$
	$\bar{S}$	$\frac{110}{97}$	$\frac{125}{104}$	$\frac{139}{116}$	$\frac{252}{99}$	$\frac{188}{145}$
1969	$y$	$\frac{87}{93}$	$\frac{117}{108}$	$\frac{74}{86}$	$\frac{152}{119}$	$\frac{59}{71}$
	$\bar{S}$	$\frac{99}{95}$	$\frac{119}{105}$	$\frac{118}{107}$	$\frac{200}{123}$	$\frac{137}{190}$
Среднее	$y$	$\frac{90}{96}$	$\frac{113}{104}$	$\frac{79}{90}$	$\frac{142}{111}$	$\frac{61}{83}$
	$\bar{S}$	$\frac{95}{96}$	$\frac{126}{105}$	$\frac{106}{102}$	$\frac{222}{117}$	$\frac{141}{128}$

Анализ данных табл. 6, а также материалов расчетов гидрографов половодья для каждого года (1962—1965, 1969) позволяет сделать вывод, что изменения коэффициентов вариации  $C_v$  и лесистости  $\beta$  соответственно в пределах  $\pm 10$  и  $\pm 15$  % практически не оказывают влияния на ошибки расчетов гидрографа половодья исследуемых водосборов.

Таблица 6

Значения параметров модели  $C_v$  и  $\beta$ , при которых произведены расчеты гидрографов, и ошибки расчета  $\bar{S}$  (м<sup>3</sup>/с)

Первый район Рыбинского водохранилища					Угличское водохранилище				
$C_{v, п}$	$C_{v, л}$	$\beta$	$1-\beta$	$\bar{S}$	$C_{v, п}$	$C_{v, л}$	$\beta$	$1-\beta$	$\bar{S}$
0,40	0,38	0,54	0,46	248	0,36	0,42	0,35	0,65	131
0,42	0,36	0,54	0,46	251	0,36	0,42	0,35	0,65	132
0,45	0,35	0,54	0,46	253	0,35	0,45	0,35	0,65	132
0,40	0,38	0,64	0,36	257	0,36	0,42	0,55	0,45	133
0,40	0,38	0,44	0,56	246	0,36	0,42	0,50	0,50	131
0,40	0,38	0,50	0,50	249					

Примечание. Во всех расчетах использованы коэффициенты стаивания  $a_{п} = 4,4$  и  $a_{л} = 2,4$  мм/°С. Значения  $\bar{S}$ , вычисленные по выражению (3), осреднены по пяти годам (1962—1965, 1969).

#### 1.4. Коррекция прогнозируемых (рассчитанных) расходов в замыкающем створе реки

Несовершенство схемы прогноза, в том числе трудности учета начальных условий при расчетах по кривым добегания и погрешности исходных данных, обуславливают часто ошибки прогноза. В целях снижения ошибок разработана система коррекции прогноза путем использования гидрометрических данных, известных в момент выпуска прогноза. Коррекция вводится после сравнения рассчитанных и фактических расходов воды в замыкающем створе на дату выпуска прогноза. Суть коррекции заключается в следующем: при несовпадении рассчитанного значения расхода в замыкающем створе с фактическим подбирается такой фиктивный вход, трансформация которого дает на данную дату расход, равный фактическому. Несовпадение рассчитанного и фактического расходов на данную дату может быть обусловлено некоторыми случайными причинами, поэтому необходимо было наложить на оператор коррекции условие малой инерционности, т. е. сделать его таким, чтобы возмущение входного гидрографа, вызванное коррекцией, постепенно затухало через несколько суток.

Обозначим вход (т. е. рассчитанные значения водоотдачи)

$$y_c, t = \{y_1, y_2, \dots, y_t, \dots, y_n\},$$

выход (т. е. значения расходов воды в замыкающем створе реки)

$$Q = \{Q_1, Q_2, \dots, Q_t, \dots, Q_n\}$$

и ординаты кривой добегания

$$R = \{R_1, R_{2\max}, \dots, R_k\}.$$

Расход воды в замыкающем створе реки в любой момент времени может быть вычислен по уравнению

$$Q_t = \int_0^t y_{(\tau)} d\tau K_b R(t - \tau) d\tau,$$

или, в случае дискретных величин, по формуле

$$Q_t = \sum_{i=1}^t y_i R_{t-i+1}. \quad (26)$$

При наличии отклонения рассчитанного расхода от фактического на момент выпуска прогноза, равного

$$\Delta Q_t = Q_{\phi}(t) - Q_p(t) \neq 0,$$

коррекция производится путем изменения значения водоотдачи  $y_i$ . Ошибку в расчете расхода  $\Delta Q_t$  относим к такому значению водоотдачи  $y_i$ , влияние которого в выражении (26) максимально. Такой величиной, естественно, будет множитель при  $R_{\max}$ .

Тогда на входе водоотдача может быть определена как

$$y'_{t-m'+1} = y_{t-m'+1} + \Delta y_{t-m'+1}. \quad (27)$$

где

$$\Delta y_{t-m'+1} = \Delta Q_t / R_{\max};$$

$m'$  — продолжительность в сутках от первой до максимальной ординаты кривой добегания.

Таким образом,

$$y'_{t-m'+1} = y_{t-m'+1} + \Delta Q_t / R_{\max}.$$

Все остальные значения входного гидрографа останутся неизменными. Подставляя новое значение

$$y' = (y_1, y_2, \dots, y_{t-m'+1}, \dots, y_t, y_n)$$

в формулу (26), получаем на данные сутки

$$\begin{aligned} Q_{t, \text{кор}, p} &= y_t R_1 + y_{t-1} R_2 + \dots + y_{t-m'+1} + \left( \frac{\Delta Q_t}{R_{\max}} \right) R_{\max} + \dots + y_{t-k+1} R_k = \\ &= y_t R_1 + y_{t-1} R_2 + \dots + y_{t-m'+1} R_{\max} + \dots + y_{t-k+1} R_k + \Delta Q = Q_{t, p} + \Delta Q_t = Q_{t, \phi}. \end{aligned}$$

При составлении прогноза на последующие сутки и далее возмущение входного гидрографа  $\Delta Q_t / R_{\max}$  будет оказывать все меньшее влияние на выход.

Для того чтобы проанализировать этот факт, пусть  $\Delta Q'$  — изменение выходного гидрографа, вызванное коррекцией. Как показано выше, при коррекции на данные сутки  $\Delta Q'_t$  будет равно ошибке расхода  $\Delta Q_t$ .

При прогнозировании на следующие сутки выражение (26) примет вид

$$Q_{\text{пр}, t+1} = \sum_{i=1}^{t+1} y_i R_{t-i+1} = Q_{\text{пр}, t+1} + \frac{\Delta Q}{R_{\max}} R_{\max+1};$$

$$\Delta Q_{t+1} = \frac{\Delta Q_t}{R_{\max}} R_{\max+1}.$$

При прогнозировании на  $l$  суток

$$Q'_{\text{пр}, t+l} = \sum_{i=1}^{t+l} y'_i R_{t-i+1} = Q'_{\text{пр}, t+l} + \frac{\Delta Q'}{R_{\max}} R_{\max+1};$$

$$\Delta Q'_{t+l} = \frac{\Delta Q'}{R_{\max}} R_{\max+1}.$$

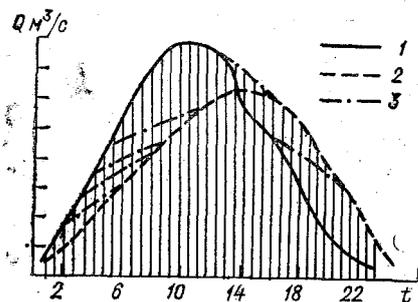


Рис. 8. Схема, иллюстрирующая эффект текущей коррекции прогноза.

1 — фактические расходы; 2 — прогноз без коррекции; 3 — прогноз с коррекцией.

Мы видим, что величина  $\Delta Q'$ , характеризующая влияние коррекции на выходной гидрограф, будет неуклонно убывать пропорционально спаду ординат кривой добегания, т. е.

$$\Delta Q' > \Delta Q'_{t+1} > \Delta Q'_{t+2} > \dots > \Delta Q'_{t+i}$$

$$\Delta Q' > \frac{\Delta Q}{R_{\max}} R_{\max+1} > \frac{\Delta Q}{R_{\max}} R_{\max+2} > \dots > \frac{\Delta Q}{R_{\max}} R_{\max+i}$$

$$R_{\max} > R_{\max+1} > \dots > R_{\max+i}$$

На графике это будет выглядеть так: рассчитанное на данные сутки значение расхода изменится настолько, чтобы достичь полного совпадения с фактическим, а впоследствии изменение рассчитанных расходов будет уменьшаться и скорректированные расходы будут плавно приближаться к рассчитанным без коррекции (рис. 8).

При коррекции гидрографа, рассчитанного по снеготаянию, в момент выпуска прогноза в замыкающем створе имеется информация о фактических расходах, характеризующих сток со всего бассейна, в то время как гидрографы с полевой и лесной частей бассейна рассчитываются раздельно. Эти гидрографы существуют лишь условно.

Следовательно, приходится искать новое значение водоотдачи полевой и лесной частей бассейна раздельно, для чего авторы применили условный способ разделения исходя из следующих соображений: между фактическими и рассчитанными на каждые сутки расходами воды существует некоторое соотношение  $Q_{t, \phi} = K Q_{t, p}$ . Условно допускаем, что ошибки расхода с полевой и лесной частями бассейна аналогичны, т. е.

$$Q_{t, \phi, p} = K Q_{t, p, p}$$

$$Q_{t, \phi, л} = K Q_{t, p, л}$$

где

$$K = Q_{t, \phi} / Q_{t, p}$$

Таким путем вводим поправку в значение рассчитанной водоотдачи раздельно для открытой и лесной частей водосбора, пропорциональную каждому из двух видов водоотдачи на каждые сутки.

Подобная коррекция производится каждый раз при составлении прогноза.

### 1. 5. Оценка методики прогнозов расходов воды

Из предыдущих разделов настоящих Указаний видно, что предлагаемые методики прогнозов ежедневных расходов воды в период половодья, основанные на моделях талого стока, значительно отличаются от традиционных методов как по структуре прогностических схем, так и по точности и объему исходной информации. В рекомендуемых методиках прогнозы расходов воды в замыкающих створах рек довольно часто выпускаются только на основе фактической метеорологической информации и ожидаемого хода метеорологических элементов на несколько суток

вперед. В данном случае прогноз составляется на основе расчетов суточных элементов водного баланса по входной информации, являющейся независимой от исходной. Безусловно, при такой методике повышается вероятность увеличения ошибок прогнозов по сравнению, например, с методом соответственных уровней (расходов) или с методикой, основанной на расчетах трансформации паводочной волны.

Несмотря на указанные особенности предлагаемой методики авторы настоящих Указаний считают, что эти методики должны оцениваться по установившейся практике.

В связи с этим оценку качества методики прогнозов ежедневных расходов воды по снеготаянию предлагается осуществлять в соответствии с Наставлением [11]. Как известно, методика прогнозов считается эффективной, а ее практическое применение оправданным только в том случае, если ошибки прогнозов, составленных по оцениваемой методике, значительно меньше равновероятных отклонений от нормы или другого заданного значения предсказываемой переменной, на которое, со статистической точки зрения, выгоднее всего ориентироваться при отсутствии прогнозов.

Для краткосрочных прогнозов расходов воды в качестве такой величины принимается сумма фактического значения расхода на дату выпуска прогноза и среднего его значения за период заблаговременности прогноза. В качестве основного критерия эффективности и применимости методики принимается отношение

$$\overline{S}/\overline{\sigma}_{\Delta} < 0,8,$$

где  $\overline{S}$  — средняя квадратическая ошибка проверочных прогнозов,  $\overline{\sigma}_{\Delta}$  — среднее квадратическое отклонение изменений предсказываемой переменной от среднего ее значения за период заблаговременности прогноза.

Поскольку по предлагаемым методикам обычно составляются прогнозы на 3—5 сут вперед, то указанная оценка должна быть сделана отдельно для 1, 2, 3, 4 и 5-х суток.

Для окончательного решения вопроса о пригодности предлагаемой методики для оперативной практики рекомендуется провести ее испытания в соответствии с предложениями, изложенными в работе [10].

## 2. ПРИМЕРЫ РАЗРАБОТКИ ПРАКТИЧЕСКИХ СХЕМ ПРОГНОЗОВ (РАСЧЕТОВ) РАСХОДОВ ВОДЫ НЕБОЛЬШИХ РЕК ПО СНЕГОТАЯНИЮ

### 2. 1. Общие замечания

В настоящем разделе рассматриваются примеры по разработке практических схем прогнозов расходов воды (расчетов) применительно к двум бассейнам рек — Оки до г. Орла и Мологи до Устюжны. Как будет показано дальше, оба бассейна резко противоположны друг другу как по своим физико-географическим условиям, так и по условиям формирования талого стока.

Первый бассейн небольшой, находится в зоне степей, практически безлесен. Снеготаяние здесь нередко проходит при солярном типе погоды. Осадков за период снеготаяния выпадает мало. На формирование талого стока большое влияние оказывают осеннее увлажнение и глубина промерзания почвы.

Второй бассейн (р. Молога) по своим размерам в 4 раза больше первого. Он расположен в лесной зоне. В этом бассейне редко наблюдаются условия, при которых формируются большие потери талого стока. Авторы полагают, что на примере только двух резко различающихся бассейнов можно показать разнообразие подходов к решению задач, которые могут возникнуть при разработке оперативных схем прогноза для различных бассейнов рек. В частности, применительно к р. Мологе, как это будет показано дальше, прогноз расходов воды может быть основан не только на снеготаянии, но и на так называемой комбинированной модели. Она позволяет осуществлять расчет (прогноз) расходов воды в замыкающем створе реки с учетом не только снеготаяния, но и фактических расходов верхних постов.

Опыт показал, что бассейны рек, в которых лес или открытые части занимают незначительные территории (до 15 %), следует рассматривать как однородные с точки зрения растительного покрова. В этих случаях расчет снеготаяния можно осуществлять по одному коэффициенту стаивания, как для полностью залесенного или открытого бассейна. Такое допущение не приводит к существенным ошибкам в расчете гидрографа.

## 2.2. Прогноз (расчет) расходов воды р. Оки до г. Орла

**2.2.1. Краткая характеристика бассейна и исходных данных.** Бассейн р. Оки до г. Орла расположен в степной зоне Восточно-Европейской равнины и занимает площадь 4900 км<sup>2</sup>. Рельеф эрозионный, с достаточно развитой сетью оврагов и балок и обширными плоскими водораздельными пространствами, занимающими до 50 % площади. В бассейне широко распространены черноземные почвы, площади которых на 75—80 % используются под посевы сельскохозяйственных культур. Бассейн практически безлесен, коэффициент лесистости составляет лишь около 0,04.

Густота речной сети составляет 1,6 км/км<sup>2</sup>. Длина реки от истока до г. Орла равна 114 км. Для рассматриваемого бассейна были использованы материалы гидрометеорологических наблюдений за 1947—1965 гг., собранные главным образом В. Д. Комаровым при выполнении работы [9]. Материалы включают в себя следующие осредненные данные по бассейну:

- о максимальных запасах воды в снеге,
- о запасах воды в ледяной корке,
- об осадках от даты максимума до начала снеготаяния,
- об ежедневных осадках за период снеготаяния и всего половодья,
- о глубине промерзания почвы,
- о содержании влаги в 100-сантиметровом слое почвы (индекс осеннего увлажнения),
- о суточной и средней суточной температуре воздуха,
- о плотности снежного покрова перед снеготаянием,
- о скорости ветра и облачности,
- о средних суточных расходах воды у г. Орла за периоды половодья,
- о средних суточных значениях грунтовой составляющей.

Во всех расчетах гидрографа половодья вычисление максимальных запасов воды в снежном покрове сделано с учетом накопления снега в овражно-балочной сети. Для этого максимальные запасы, вычисленные по снегомерным съемкам, умножались на коэффициент, равный 1,15.

Средние значения составляющих водного баланса за половодье, вычисленные на основе перечисленных материалов, приведены в табл. 7.

Данные табл. 7 показывают, что все элементы водного баланса за многолетний период варьируют весьма значительно. Этим в определенной степени можно объяснить заметные колебания средних коэффициентов стока за половодье, которые за 19-летний период изменялись от 0,3 и практически до 1,0, при среднем значении 0,66. Причем нередко при больших запасах воды в снежном покрове наблюдается низкий сток (1956, 1957, 1964 гг.). В эти годы коэффициенты стока за половодья составляли лишь 0,3—0,5. Данные показывают, что в эти годы наблюдались небольшая глубина промерзания почвы и сравнительно низкое осеннее увлажнение бассейна, что предопределило большие потери талых вод.

**2.2.2. Параметры и константы, используемые при расчетах; результаты расчета гидрографа.** По методике, изложенной в разд. I настоящих Указаний, определены следующие параметры и константы, необходимые для расчета гидрографа половодья по снеготаянию:

- коэффициент стаивания (мм/°С) только для поля, поскольку бассейн р. Оки до г. Орла практически безлесен;
- параметр, характеризующий кривую распределения снежного покрова для поля  $\alpha_0$ , значение которого определяется коэффициентом вариации  $C_v$ ;
- гамма-распределение

$$\Gamma(\alpha) = \Gamma(\alpha_0 + 1 / \alpha);$$

- параметр, характеризующий водопоглотительную способность бассейна в период снеготаяния  $P_{(m)}$ ;

Таблица 7

Средние значения составляющих водного баланса бассейна р. Оки до г. Орла за половодье, мм

Год	Запас воды в снежном покрове и ледяной корке к началу снеготаяния	Жидкие осадки за период снеготаяния	Количество воды, поступившей на бассейн за период снеготаяния	Сток за половодье без учета дождей после схода снежного покрова	Потери талых вод	Коэффициент талого стока
1947	150	10	160	133	27	0,83
1948	97	5	102	63	39	0,62
1949	73	13	86	40	46	0,46
1950	65	23	86	50	36	0,62
1951	87	54	140	115	25	0,82
1952	136	5	141	96	45	0,68
1953	69	1	70	55	15	0,79
1954	71	23	92	48	44	0,52
1955	96	27	121	80	41	0,87
1956	109	20	124	62	62	0,50
1957	140	1	141	40	101	0,28
1958	83	9	87	74	13	0,85
1959	68	2	70	54	16	0,77
1960	134	9	140	107	33	0,76
1961	43	25	68	25	43	0,36
1962	57	11	68	49	19	0,72
1963	108	12	120	117	3	0,98
1964	132	56	188	90	98	0,48
1965	52	13	65	36	29	0,55
Среднее	93	17	109	70	39	0,65

- ординаты кривой добегания  $R$ ;
- коэффициент размерности  $K_Q$  для перехода от суточного слоя стока к ежедневным расходам воды;
- максимальный запас воды в снежном покрове перед началом снеготаяния  $X_{\max}$  (сведения об  $X_{\max}$  помещены в табл. 7);
- плотность снежного покрова перед снеготаянием  $\rho$ ;
- расход воды у г. Орла перед датой начала половодья, который характеризует грунтовую составляющую.

Полученные параметры и константы приведены в табл. 8.

С учетом перечисленных параметров, а также необходимых исходных данных произведены расчеты гидрографов половодья для р. Оки до г. Орла за все указанные годы (1947—1965) по схеме, показанной на рис. 3.

При расчетах гидрографа интенсивность снеготаяния вычислялась тремя способами, а именно: по коэффициенту стаивания, по формулам Попова [3, 12] и по номограмме Шуляковского из работы [3].

В последнем случае интенсивность снеготаяния вычислялась по номограмме Шуляковского, представленной следующей формулой:

$$h_c = \begin{cases} (0,022D + 2,85)(t_{cp} + 0,0202D + 1,15), \\ 0 \text{ при } t_{cp} \leq -2 \text{ }^\circ\text{C}, \end{cases}$$

где  $D$  — число расчетных суток, начиная от начальной даты (19/II);  $t_{cp}$  — средняя суточная температура воздуха, осредненная по бассейну.

Сопоставление рассчитанных гидрографов с фактическими за все годы показало следующее:

— в большинстве случаев гидрографы, рассчитанные с использованием номограммы Шуляковского и метода Попова [12], имеют лучшее совпадение с

Таблица 8

Параметры и константы, использованные в расчетах гидрографа  
половодья р. Оки на основе модели талого стока

Параметры и константы	Период, год	Значение	Параметры и константы	Период, год	Значение
Коэффициент стаивания, мм/°С	1947—1965	6,1	Параметр $P_{(m)}$	1958	11
				1959	16
Параметр $\alpha_0$	1947—1965	5,00		1960	36
Гамма-распределение $\Gamma (\alpha_0)$	1947—1965	24,0		1961	73
				1962	22
Коэффициент размерности $KQ$	1947—1965	56,4		1963	3
				1964	130
Параметр $P_{(m)}$	1947	28	Ординаты кривой добегаания $R$	1955	34
	1948	39		1951—1955	1—0,03;
1949	57	2—0,16;			
1950	40	3—0,27;			
1951	25	4—0,24;			
1952	46	5—0,16;			
1953	15	6—0,08;			
1954	50	7—0,04;			
1955	43	8—0,02			
1956	80				
1957	195				

фактическими по сравнению с гидрографами, полученными при помощи коэффициента стаивания. Это особенно заметно в годы, когда снеготаяние начинается по существу при средней суточной температуре, близкой к нулю (солярный тип погоды), а также когда снеготаяние прерывается возвратом холодов. В этом отношении весьма показательными годами для рассматриваемого бассейна являются 1949, 1950, 1952, 1959 и 1960;

— для расчета интенсивности снеготаяния на реках, расположенных в лесостепной и степной зонах, подобно верховьям р. Оки, целесообразно использовать не постоянный коэффициент для всего периода снеготаяния, а переменный во времени.

Для получения такого коэффициента следует использовать данные табл. 2.

2.2.3. **Схема краткосрочных прогнозов воды.** Технология составления краткосрочных прогнозов расходов воды на несколько (3—5) суток вперед аналогична расчетам, выполненным в предыдущем параграфе. Она заключается в следующем. На основании расчета ежедневных снеготаяния и потерь определяется водоотдача бассейна, а затем с помощью кривых добегаания производится расчет расходов воды в замыкающем створе реки. К этим расходам добавляется грунтовая составляющая, которая характеризуется значением  $Q$  (м<sup>3</sup>/с) перед датой начала половодья. Эти расчеты делаются на базе фактических данных о снежном покрове, суточной температуре воздуха и осадках до даты выпуска прогноза, а также с учетом прогноза осадков и температуры воздуха на 2—4 сут вперед.

Кроме того, для рассматриваемой методики необходимо знать параметр  $P_{(m)}$ , который определяется из долгосрочного прогноза объема стока половодья.

Для указанных целей на основании воднобалансовых и других характеристик бассейна р. Оки до г. Орла установлены зависимости:

а) стока  $y$  от снегозапасов  $X$ , сложенных с осадками за период снеготаяния, и осеннего увлажнения  $m$ ,  $y = f(X + x', m)$  (рис. 9);

б) параметра  $P_{(m)}$  от осенней увлажненности бассейна  $m$  и глубины промерзания почвы  $h$ ,  $P_{(m)} = f(m, h)$ .

Эти зависимости показаны на рис. 10. В качестве характеристики осеннего увлажнения для рассматриваемого бассейна принято содержание влаги в 100-сантиметровом слое почвы.

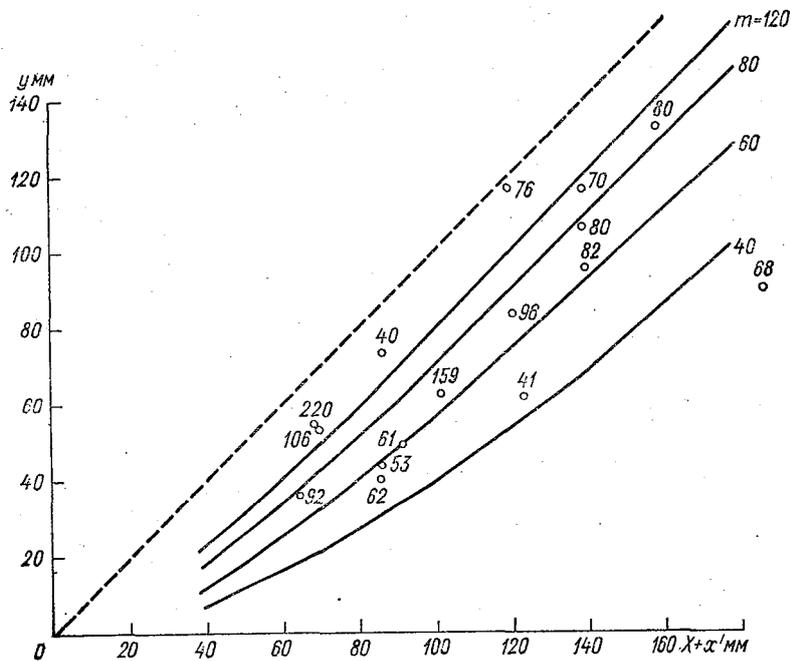


Рис. 9. Зависимость весеннего стока  $y$  р. Оки у г. Орла от общих осадков  $x + x'$  и индекса осеннего увлажнения  $m$ .  
Цифры у точек — индекс осеннего увлажнения.

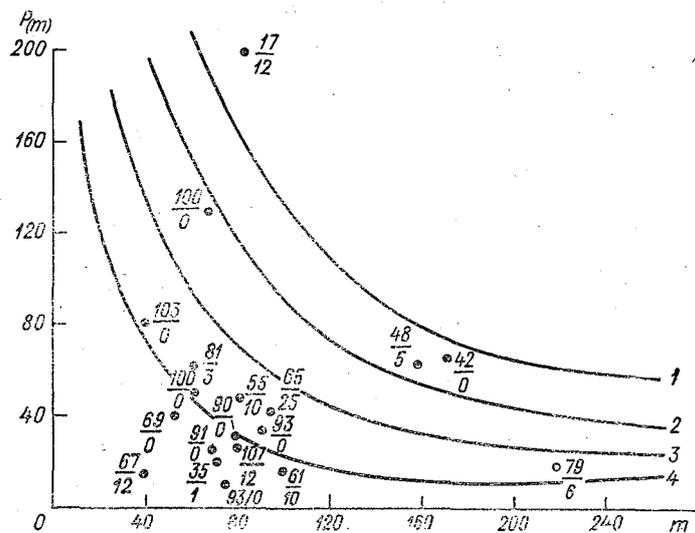


Рис. 10. Зависимость максимальных потерь талых вод  $P(m)$  от индекса осеннего увлажнения  $m$  и глубины промерзания  $L$  для р. Оки у г. Орла.

1)  $L < 40$  см, 2)  $L = 40...49$  см, 3)  $L = 50...59$  см, 4)  $L > 60$  см.  
У точек над чертой — глубина промерзания, под чертой — толщина ледяной корки.

Опыт показал, что зависимости, представленные на рис. 9 и 10, дают удовлетворительные результаты при выпуске краткосрочных прогнозов расходов воды р. Оки у г. Орла по снеготаянию.

### 2.3. Прогноз (расчет) расходов воды р. Мологи у Устюжны

**2.3.1. Краткая характеристика бассейна и исходных данных.** Бассейн р. Мологи до Устюжны расположен в пределах Мологского плато и Мологско-Шекснинской низины и занимает площадь 19 100 км<sup>2</sup>. Мологское плато занимает территорию верховьев рек Мологи и Кобожи и представляет собой равнину с преобладанием эрозионных и ледниковых форм рельефа. Среднее и нижнее течение р. Мологи приходится на Мологско-Шекснинскую низину, представляющую собой аллювиальную песчаную равнину.

В бассейне широко распространены суглинистые, супесчаные и песчаные почвы. Около половины площади бассейна занято лесом, коэффициент лесистости составляет 0,45. Бассейн расположен в зоне избыточного увлажнения. Это, а также наличие суглинистого моренного покрова, находящегося близко от поверхности, предопределило здесь неглубокое залегание грунтовых вод, преимущественно 0—10 м. Лишь под моренными холмами и грядами они уходят на 5—20 м. К местам неглубокого залегания грунтовых вод приурочено распространение болот, площади которых занимают около 10 % территории бассейна.

Вследствие незначительных размеров бассейна климатические условия его практически однородны. В среднем за холодный период года на его территории выпадает около 120 мм твердых осадков. Весной снеготаяние продолжается две-три недели в поле и около трех недель в лесной части бассейна. В среднем за период снеготаяния в полевой части бассейна выпадает 20—25 мм жидких осадков, а в лесной — 30—40 мм.

При разработке методики прогноза и расчета весеннего половодья р. Мологи были использованы материалы гидрометеорологических наблюдений за 1951—1973 гг. Материалы включают в себя следующие осредненные данные раздельно для полевой и лесной частей бассейна:

- о максимальных запасах воды в снеге;
- об осадках от даты максимума до даты начала снеготаяния;
- об ежедневных осадках за период снеготаяния и всего половодья;
- о средней суточной температуре воздуха за период, охватывающий 5—10 сут до начала снеготаяния, а также весь период снеготаяния до окончательного схода снежного покрова в лесу;
- о плотности снежного покрова перед снеготаянием;
- о средних месячных расходах воды за осенне-зимние месяцы по трем гидропостам р. Мологи (Спас-Забережье, Овинчище и Устюжна);
- о средних суточных расходах воды у Устюжны;
- о значении грунтовой составляющей для каждого года у Устюжны, принимаемой равной расходу воды в указанном створе за сутки до начала половодья.

Здесь уместно отметить следующее. В тех случаях, когда по данным наблюдений было трудно определить максимальные запасы воды в снежном покрове раздельно для поля и леса, использовался простой прием — максимальные запасы в поле умножались на 1,15, что позволило приблизительно оценить снегозапасы в лесу. Кроме того, для приведения к однородному ряду материалов о снегозапасах, полученных за многолетний период разными методами до 1963 г. и после, во все данные о снегозапасах до 1963 г. введена поправка, равная 10 %.

Средние значения составляющих водного баланса за половодье, вычисленные на основе перечисленных материалов, приведены в табл. 9. Анализ данных, использованных при разработке рассматриваемой методики, а также сведений табл. 9 показывает, что в весенний период в бассейне р. Мологи сравнительно редко создаются условия для больших потерь талых вод. В самом деле, из 22 лет только в трех случаях коэффициент стока оказался менее 0,5. В то же время более чем в 50 % случаев этот коэффициент превышает 0,7. Указанное обстоятельство можно объяснить рядом причин и прежде всего тем, что на значительной площади грунтовые воды залегают неглубоко, а также тем, что нередко в зимний период на открытых частях бассейна мерзлые почво-грунты сцементированы льдом.

**2.3.2 Расчет гидрографа половодья. Схемы расчета.** В разд. 1 настоящих Указаний рассмотрены две схемы расчета гидрографа половодья на основе снеготаяния:

Таблица 9

## Средние значения составляющих водного баланса бассейна р. Мологи до Устюжны за половодье, мм

Год	Запас воды в снежном покрове к началу снеготаяния	Жидкие осадки за период снеготаяния	Количество воды, поступившей на бассейн за период снеготаяния	Сток за половодье без учета дождей после схода снежного покрова в лесу	Потери талых вод	Коэффициент талого стока
1951	81	43	124	114	10	0,91
1952	147	13	160	93	67	0,58
1953	119	39	158	124	34	0,78
1954	56	48	104	81	23	0,77
1955	184	71	255	222	33	0,87
1956	134	73	207	147	60	0,71
1957	125	25	150	143	7	0,95
1958	144	34	178	163	15	0,91
1959	151	35	186	161	25	0,86
1960	144	10	154	94	60	0,61
1961	80	78	158	114	44	0,72
1962	152	18	170	139	31	0,81
1963	87	6	93	64	29	0,68
1964	103	20	123	67	56	0,54
1965	156	9	165	98	67	0,59
1966	181	88	269	206	63	0,76
1967	97	46	143	81	62	0,56
1968	122	45	167	92	75	0,55
1969	122	15	137	66	71	0,48
1970	115	35	150	94	56	0,62
1971	62	13	75	32	43	0,42
1972	58	36	94	46	48	0,48
Среднее	119	36	155	111	44	0,71

полная и неполная. Для рассматриваемого бассейна использованы обе расчетные схемы.

Кроме того, здесь показана возможность использования еще и третьей схемы, называемой комбинированной. Эта схема предусматривает расчет расходов воды в замыкающем створе реки с учетом снеготаяния и фактических расходов воды в створах, расположенных выше по течению. Причем расходы в этих створах предвычисляются на основе снеготаяния по одной из двух указанных схем.

Применительно к бассейну р. Мологи технология расчета расходов по этой схеме сводится к следующему:

а) по неполной схеме, представленной на рис. 3, производится расчет расходов воды по снеготаянию в двух гидростворах. Один из них — с. Забережье, расположен на р. Мологе, в 155 км выше Устюжны, а второй — Горны — на р. Кожобе, в 70 км от ее слияния с Мологой;

б) по сумме фактических расходов воды у створов с. Забережье и Горны с соответствующими коэффициентами и кривыми добегаания рассчитываются расходы воды р. Мологи у Устюжны. Эти расчеты делаются с учетом расходов воды, вычисленных для верхних постов по снеготаянию.

Для получения равенства объемов половодья входного и выходного створов сумма расходов воды с. Забережье и Горны умножается на  $K_w=1,65$ .

Параметры и константы, используемые для расчетов по различным схемам. По способам, изложенным в разд. 1, определены параметры и константы, необходимые для расчета гидрографа половодья р. Мологи у Устюжны по трем схемам. Полученные параметры и константы приведены в табл. 10.

Таблица 10  
 Параметры и константы, используемые в расчетах гидрографа половодья  
 р. Мологи на основе модели талого стока

Характеристика	Период, год	Полная модель	Неполная модель	Комбинированная модель
Коэффициент стаивания, мм/°С	1961—1972			
$a_n$		4,4	4,4	4,4
$a_d$		2,4	2,4	2,4
Коэффициент лесистости $\beta$	1961—1972	0,45	0,45	0,50
Параметр	1961—1972			
$\alpha_{o, n}$		6,26	6,26	6,26
$\alpha_{o, d}$		7,72	7,72	7,72
Гамма-распределение				
$\Gamma(\alpha_o)_n$		184,8	184,8	184,8
$\Gamma(\alpha_o)_d$		2780	2780	2780
Коэффициент размерности $K_Q$	1961—1972	221	221	139
Параметры кривых добегаия	1961—1965			
$n_n/n_d$		6,85/5,41	—	—
$\tau_{L, n}/\tau_{L, d}$		2,08/1,15	—	—
$n$		—	4,70	5,0
$\tau$		—	2,03	0,5
Параметры $P_{(m)}$	1961	109	109	109
	1962	77	77	77
	1963	60	60	60
	1964	177	177	177
	1965	125	125	125
	1966	105	105	105
	1967	155	155	155
	1968	117	117	117
	1969	177	177	177
	1970	95	95	95
	1971	65	65	65
	1972	64	64	64
Грунтовая составляющая $Q_{гр}$	1961	100	100	60
	1962	100	100	30
	1963	40	40	20
	1964	50	50	20
	1965	80	80	30
	1966	50	50	60
	1967	50	50	40
	1968	40	40	25
	1969	50	50	25
	1970	50	50	25
	1971	35	35	19
	1972	50	50	43

Примечание. Параметрам  $n$  и  $\tau_L$  соответствуют кривые добегаия, ординаты которых помещены в прил. 1.

Результаты расчетов и их оценка. С учетом параметров, а также необходимых исходных данных произведены расчеты гидрографов половодья для р. Мологи у Устюжны за 1961—1972 гг. по трем указанным схемам.

Путем сравнения фактических и рассчитанных гидрографов половодья как визуально по соответствующим графикам, так и при помощи статистической обработки данных произведена оценка результатов расчетов для каждой схемы в отдельности.

Статистическая оценка результатов расчетов произведена в соответствии с Наставлением [11], как описано в разд. 2 настоящих Указаний. Для этой цели были определены средние квадратические отклонения от нормы ежедневных расходов воды р. Мологи у Устюжны на период заблаговременности прогноза для 3, 4 и 5-х суток, т. е. вычислены значения  $\sigma_{\Delta, 3}$ ,  $\sigma_{\Delta, 4}$ ,  $\sigma_{\Delta, 5}$ .

Ограничение в 5 сут было сделано исходя из того, что по условию следует разработать методику прогноза с пятисуточной заблаговременностью. Значения  $Q_{\Delta}$  для 3, 4 и 5-х суток соответственно равны 144, 179 и 210 м<sup>3</sup>/с.

Полученные средние оценки  $S/\sigma_{\Delta}$  за 1961—1972 гг. по различным схемам даны в табл. 11.

Таблица 11

Оценка результатов расчета ежедневных расходов воды р. Мологи по трем схемам за периоды половодья 1961—1972 гг. (средние значения)

Заблаговременность, сут	Схема		
	полная	неполная	комбинированная
3	0,81	0,87	0,70
4	0,72	0,76	0,59
5	0,67	0,70	0,51

Здесь следует подчеркнуть, что проведенная оценка рассчитанных гидрографов половодья весьма жесткая и сопоставима с условиями оценки прогнозов, выпускаемых в оперативном режиме (в которые, как будет показано дальше, вводится соответствующая коррекция). В рассматриваемой же методике расчета начальные условия практически не учитывались, поэтому при расчетах всего гидрографа происходило накопление ошибок.

Анализируя результаты расчетов гидрографа половодья р. Мологи по различным схемам, можно сделать следующие выводы и одновременно, исходя из этих выводов, дать соответствующие рекомендации:

1. Наиболее высокую точность имеет комбинированная схема расчета. Следовательно, для краткосрочных прогнозов следует отдать ей предпочтение. В то же время она требует несколько больше исходных данных по сравнению с двумя другими. Из-за этого нередко применение этой схемы затруднено.

2. В большинстве случаев полная схема дает несколько лучшие результаты по сравнению с неполной, несмотря на то что в той и другой схемах используется одна и та же исходная информация, включая потери стока. Напомним, что по полной схеме расчеты всех элементов водного баланса, включая сток, ведутся раздельно для поля и леса, а по неполной схеме такой расчет производится только для интенсивности снеготаяния. Разница еще заключается и в том, что в полной схеме водоотдача берется пропорционально площадям поля и леса и доводится до замыкающего створа по частным кривым добегания, а в неполной — водоотдача и кривая добегания используются осредненными.

Можно ожидать, что при усовершенствовании метода расчета потерь с лесной и полевой частей бассейна результаты расчетов по полной схеме будут еще лучше.

Следовательно, полная схема расчета более перспективна по сравнению с упрощенной. Разумеется, такой вывод относится к условиям, аналогичным бассейну р. Мологи. Однако подчеркнем, что полную схему следует применять, когда будет разработан удовлетворительный способ деления потерь на полевую и лесную составляющие. Поэтому, хотя полная схема дала несколько лучшие результаты по сравнению с упрощенной, для прогнозов рекомендуется использовать последнюю.

2.3.3. Схемы краткосрочных прогнозов. С учетом изложенных выводов построены две оперативные схемы прогнозов ежедневных расходов воды р. Мологи, первая из которых основана на упрощенном варианте модели, а вторая на комбинированном. Обе схемы даны на рис. 11.

По первому варианту технология составления прогноза заключается в следующем. На основании расчета ежедневных значений снеготаяния и потерь определяется водоотдача бассейна  $u$ , а затем с помощью кривой добегания производится расчет расходов воды у Устюжны  $q$ , сформированных за счет талого стока.

После добавления к нему грунтовой составляющей  $Q_{гр}$  и его коррекции получаем окончательный прогноз у Устюжны  $Q_{у.г}$ . Эта схема предусматривает использование лишь одной кривой добегания, что позволяет более обоснованно вносить соответствующие коррективы в процессе выпуска прогноза.

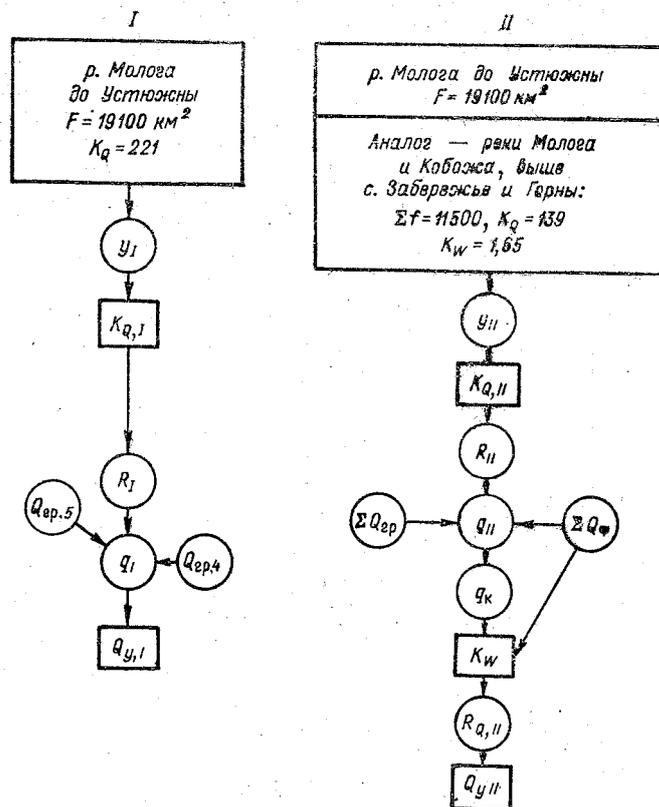


Рис. 11. Блок-диаграммы прогноза по упрощенной (I) и комбинированной (II) схемам.

В схеме I —  $Q_{гр}$ ,  $Q_{ф}$ ,  $q$ ,  $Q_y$  — соответственно значения расхода у Устюжны за сутки до начала снеготаяния, на дату выпуска прогноза, прогноз и прогноз с коррекцией. В схеме II —  $\Sigma Q_{гр}$ ,  $\Sigma Q_{ф}$  — соответственно значения суммы расходов двух верхних постов за сутки до начала снеготаяния и на дату выпуска прогноза;  $q_{II}$ ,  $q_k$ ,  $Q_y$  — прогнозируемые значения расходов соответственно к верхним створам без коррекции и с коррекцией, а также в замыкающем створе.

Коррекция прогноза производится автоматически по методике, изложенной в разд. I настоящих Указаний.

При выпуске прогноза все расчеты выполняются по фактическим данным о снежном покрове перед началом снеготаяния, о суточных значениях температуры воздуха и осадков за все сутки, начиная от даты начала снеготаяния, включая дату выпуска прогноза, а также с учетом прогноза осадков и температуры воздуха на 3—5 сут вперед. В расчетах используются параметры и константы, помещенные в табл. 10 и в табл. 1 прил. 1.

Кроме того, для рассматриваемой методики прогноза необходимо заранее знать параметр  $P_{(m)}$ , который определяется по долгосрочному прогнозу стока половодья. Для указанных целей на основе водно-балансовых и других характеристик бассейна р. Мологи до Устюжны установлена зависимость стока  $y$  от снегозапасов  $X$ , сложенных с осадками за период снеготаяния  $x'$ , и осеннего увлажнения  $m$ ,

$$y = f(X + x', m).$$

Эта зависимость показана на рис. 12.

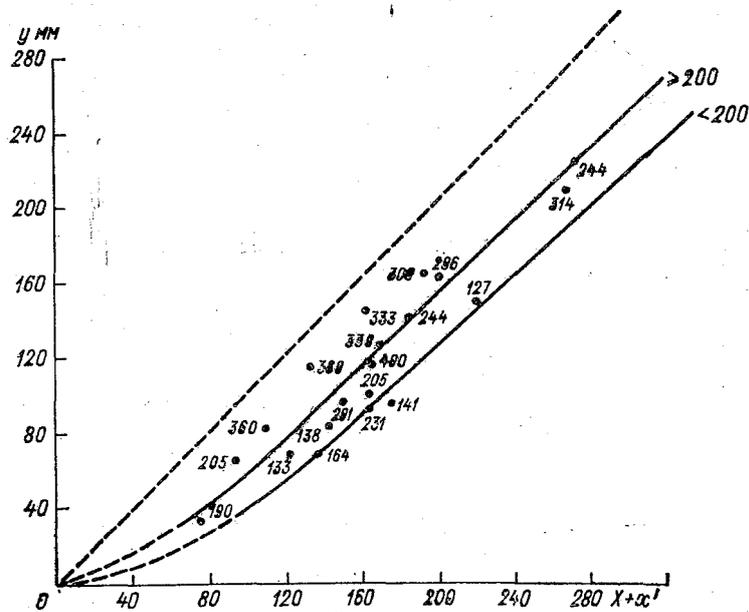


Рис. 12. Зависимость стока  $y$  от индекса осеннего увлажнения  $m$  и снегозапасов  $X$ , сложенных с осадками за период снеготаяния  $x'$ .

Цифры у точек и кривых — индексы осеннего увлажнения.

В качестве характеристики осеннего увлажнения для рассматриваемого бассейна принята сумма средних месячных расходов воды в трех створах: с Забережье, Овинчище и Устюжна за период декабрь—февраль с соответствующими коэффициентами, откуда индекс численно равен

$$m = 0,5 \sum_1^3 Q_{XII} + \sum_1^3 Q_I + 2 \sum_1^3 Q_{II}. \quad (28)$$

Исходя из уравнения (27) и связи на рис. 12 определяется параметр  $P_{(m)}$  для всего периода половодья перед его началом.

Второй вариант схемы (см. рис. 11) предусматривает составление прогноза расходов у Устюжны по фактическим расходам двух верхних постов, а также с учетом снеготаяния в этих створах. По условию комбинированной схемы необходимо было разработать специальную методику предвычисления расходов воды в верхних створах по снеготаянию.

Для рассматриваемых целей была использована та же схема расчетов, что и в варианте 1. Допускалось, что в бассейне р. Мологи снеготаяние и водоотдача талого стока одинаковы как до замыкающего, так и до верхних створов. Такой подход дал положительные результаты. В этом случае разница в значениях талого стока в верхних и замыкающем створах учитывалась только лишь при помощи коэффициентов  $K_Q$ .

Начиная с 1976 г. изложенная методика используется как составная часть при прогнозе притока воды в Рыбинское водохранилище. Опыт показал, что точность прогнозов расходов воды изложенным методом в основном удовлетворительна. Вместе с тем нередко ошибки прогнозов превышают допустимые. Это связано со многими причинами, о которых будет сказано в общих выводах настоящих Указаний.

### 3. ПРИМЕРЫ РАЗРАБОТКИ ПРАКТИЧЕСКИХ СХЕМ ПРОГНОЗОВ (РАСЧЕТОВ) ЕЖЕДНЕВНОГО ПРИТОКА ВОДЫ В ВОДОХРАНИЛИЩА В ПЕРИОД ПОЛОВОДЬЯ

#### 3.1. Принципы построения схемы прогноза

В настоящей главе рассматриваются методы прогноза весеннего притока в Угличское, Нижнекамское и Горьковское водохранилища с заблаговременностью пять суток.

Предложенные методы прошли испытания в оперативных условиях. Они показали перспективность их применения в практике, целесообразность дальнейших исследований для совершенствования и развития данного направления в службе прогнозов.

Для всех рассматриваемых водохранилищ авторы использовали одну и ту же методическую основу. Для малых рек, на которых естественное время добегания воды меньше требуемой заблаговременности, схема прогноза целиком строилась на методологии, изложенной в гл. 2 настоящих Указаний. Прогнозы расходов воды в замыкающих створах средних и больших рек впадающих в водохранилища, основаны или на комбинированной модели (разд. 2 настоящих Указаний), или целиком на расчетах стока малых рек по частным кривым добегания.

При разработке методики прогнозов в основу положены следующие принципы:

а) методика должна предусматривать ежедневное составление прогноза притока с заблаговременностью не менее пяти суток, что превышает естественное время добегания воды от входных створов большинства малых рек, впадающих непосредственно в перечисленные водохранилища, а также малых рек в низовьях р. Камы;

б) прогноз незарегулированного притока воды в водохранилища указанных выше малых рек базируется на расчетах по снеготаянию расходов воды по районам, каждый из которых имеет более или менее однородные физико-географические условия. Бассейн Угличского водохранилища рассматривается как один район. Здесь схема прогноза полностью основана на снеготаянии. В бассейне Горьковского водохранилища выделено 14 районов, а в Нижнекамском — 6, в каждый из которых входит один или несколько створов малых рек;

в) если время добегания воды от входного створа реки до водохранилища позволяет получить требуемую заблаговременность (пять суток), то для прогноза притока используются фактические расходы воды в верхних створах (р. Белая и т. д.). Если продолжительность естественного добегания воды от входного створа до водохранилища менее пяти суток, то расход воды в замыкающем створе малого бассейна (района) определяется по снеготаянию. Снеготаяние рассчитывается на основании фактических и прогнозируемых метеорологических данных по схемам, изложенным в гл. 2 настоящих Указаний;

г) расчеты добегания воды от гидростворов больших рек по гидрометрическим данным, а также талого стока малых рек (районов) по данным о снеготаянии и от районов до водохранилища производятся по кривым добегания, параметры которых для талого стока определяются раздельно для леса и поля по методике, изложенной в разд. 1;

д) прогноз притока к акватории составляется примерно для тех же створов, которые приняты в качестве входных при расчете фактического бокового притока воды в водохранилище. Благодаря этому можно контролировать оправданность прогнозов бокового притока как суммарного, т. е. как для всего водохранилища, так и для отдельных районов водосбора;

е) прогнозы талого стока в замыкающих створах малых рек (районов) ежедневно корректируются по фактическим расходам воды малых рек, а также по фактическим и прогнозируемым метеорологическим элементам.

#### 3.2. Прогноз (расчет) притока воды в Угличское водохранилище по снеготаянию

3.2.1. Краткая характеристика бассейна и водохранилища. Бассейн Верхней Волги до створа Угличской ГЭС занимает площадь 60 020 км<sup>2</sup>. Приток воды к

створу ГЭС складывается из зарегулированного стока с площади 40 580 км<sup>2</sup> (67,6 %) и незарегулированного с площади 19 440 км<sup>2</sup> (32,4 %). Рассматриваемое водохранилище относится к водохранилищам речного типа. При НПП (нижний подпорный горизонт) 113 м площадь его зеркала составляет 249 км<sup>2</sup>, общий объем — 1,25 км<sup>3</sup>, мертвый — 0,44 км<sup>3</sup>, полезный — 0,81 км<sup>3</sup>. Регулирующий объем водохранилища мал и составляет лишь 6 % годового притока в него. За половодье объем притока в водохранилище обычно в 5—8 раз превышает полезный объем, и поэтому большая часть весеннего стока проходит через гидроузел транзитом. При НПП подпор водохранилища распространяется до плотины Ивановской ГЭС. Наиболее крупными притоками водохранилища являются реки Медведица, Нерль и Дубна.

Большая часть бассейна расположена на территории низменности. В пределах этого бассейна она окаймлена с юга Смоленской возвышенностью, с севера плато в районе р. Мологи. В бассейне широко развиты слабо- и среднеподзолистые почвы. Леса по территории распространены неравномерно. Залесенность водосбора р. Медведицы около 25 %, в то время как в бассейнах рек Дубны и Нерли она достигает 50 %. В среднем залесенность составляет 35 %. Бассейн характеризуется сравнительно высокой заболоченностью (11 %). Это обусловливается тем, что он расположен в зоне избыточного увлажнения, а также неглубоким залеганием грунтовых вод. На большей части территории они находятся на глубине 0—10 м.

Площадь бассейна сравнительно мала, поэтому по климатическим условиям он более или менее однороден. Переход температуры воздуха через нуль весной происходит здесь обычно в последней декаде марта или в первых числах апреля и практически одновременно на всей территории. Средние даты начала снеготаяния для южных и северных районов различаются всего на одни сутки. Продолжительность снеготаяния в поле 14—16 сут, в лесу 21—23 сут. Исходя из распределения стока, лесистости, заболоченности почв и осадков бассейн водохранилища рассматривается как один район.

Как будет показано далее, для этого водохранилища методика прогноза притока целиком базируется на снеготаянии.

**3.2.2. Исходные данные и характеристика водного баланса водосбора за половодье.** При разработке методики прогноза (расчета) ежедневного притока воды в водохранилище и оценки элементов водного баланса водосбора были использованы материалы гидрометеорологических наблюдений за 1951—1973 гг.

Материалы включают в себя осредненные по бассейну сведения о приходных и расходных составляющих водного баланса отдельно для поля и леса, в том числе:

- максимальные запасы воды в снежном покрове;
- осадки, выпадающие от даты максимума до начала снеготаяния;
- ежедневные осадки за период снеготаяния и всего половодья;
- среднюю суточную температуру воздуха за период, охватывающий 5—10 сут до начала снеготаяния, а также весь период снеготаяния до окончательного схода снежного покрова в лесу;
- плотность снежного покрова перед снеготаянием;
- средние месячные расходы воды за осенне-зимние месяцы по трем рекам, впадающим в водохранилище (р. Медведица — Большие Сетки, р. Нерль — Подол, р. Дубна — Вербилки);
- фактический суточный приток воды в водохранилище за период половодья. Этот приток вычисляется по специальной методике, основанной на суммировании ежедневных расходов воды рек, впадающих в водохранилище. Причем эти расходы предварительно умножаются на коэффициенты, которые больше единицы;

— грунтовая составляющая притока воды в водохранилище, принимаемая равной суточному притоку воды за сутки до начала половодья.

Здесь следует обратить внимание на следующее. В тех случаях, когда по данным наблюдений определить максимальные запасы воды в снежном покрове отдельно для поля и леса было невозможно, использовался простой прием: максимальные запасы воды в поле умножались на коэффициент 1,15, что позволяет приближенно определять снегозапасы на лесной части бассейна. Кроме того, для приведения материалов о снежном покрове к однородному ряду за многолетний период все значения снегозапасов до 1963 г. умножены на поправку, равную 10 %.

Средние значения составляющих водного баланса за половодье, вычисленные на основе перечисленных материалов, приведены в табл. 12.

Таблица 12  
Средние значения составляющих водного баланса водосбора Углицкого водохранилища за половодье, мм

Год	Запас воды в снежном покрове к началу снеготаяния	Жидкие осадки за период снеготаяния	Количество воды, поступившей на бассейн за период снеготаяния	Сток за половодье без учета дождей после схода снежного покрова в лесу	Потери талых вод	Коэффициент талого стока
1951	85	38	123	98	25	0,80
1952	148	12	160	58	102	0,36
1953	117	26	143	76	67	0,53
1954	61	28	89	50	39	0,56
1955	197	74	271	192	79	0,71
1956	138	46	184	95	89	0,52
1957	139	22	161	137	24	0,85
1958	151	46	197	123	74	0,62
1959	116	19	135	105	30	0,78
1960	137	13	150	62	88	0,41
1961	89	50	139	96	43	0,69
1962	130	14	144	91	53	0,63
1963	88	3	92	66	25	0,73
1964	118	14	132	46	86	0,35
1965	140	22	162	53	109	0,33
1966	158	53	211	146	65	0,69
1967	114	29	143	62	81	0,43
1968	151	51	202	89	113	0,44
1969	118	24	142	55	87	0,39
1970	156	45	201	117	84	0,58
1971	54	1	55	36	19	0,66
1972	55	52	107	61	46	0,57
1973	91	18	109	49	60	0,45
Среднее	125	32	157	89	68	0,57

Анализ данных, использованных при разработке рассматриваемой методики, а также сводных характеристик в табл. 12 показывает, что все элементы водного баланса за многолетний период варьируют весьма значительно. Этим в определенной степени можно объяснить заметные колебания средних коэффициентов стока за половодье, которые за 22-летний период изменялись от 0,32 до 0,85. Вместе с тем следует подчеркнуть, что в бассейне нередко создаются условия для больших потерь. Об этом говорит тот факт, что почти в 50 % случаев коэффициенты стока за половодье были меньше или около 0,5. Причем нередко (1952, 1956, 1965, 1968, 1970 гг.) низкий сток наблюдался при снегозапасах выше нормы.

В общем можно отметить, что годам с низким половодьем, как правило, предшествуют невысокое осенне-зимнее увлажнение бассейна и глубокое залегание грунтовых вод.

**3.2.3. Расчеты гидрографа притока воды в водохранилище по снеготаянию.** Прежде чем решить вопрос об окончательном выборе расчетной схемы для оперативного использования, были проведены испытания нескольких вариантов модели расчета талого стока применительно к рассматриваемому водохранилищу.

В частности, были испытаны обе модели, описанные в разд. 1, т. е. полная и неполная (упрощенная). Причем полная модель была испытана в двух вариантах. Разница между ними заключалась в следующем. В первом варианте потери, определяемые параметром  $P_{(т)}$ , были взяты отдельно для поля и леса, а во втором — одинаковыми (средневзвешенными) по всему водосбору. Потери на лесной и полевой частях бассейна в данном случае учитывались лишь при помощи коэффициента лесистости.

Таблица 13

**Параметры и константы, используемые в расчетах гидрографа притока  
по трем вариантам модели**

Характеристика	Период, год	Полная модель		Неполная модель (упрощен- ная)	
		I вариант	II вариант		
Коэффициент сглаживания, мм/°С	1961—1973	4,4	4,4	4,4	
		$a_n$	2,4	2,4	2,4
Коэффициент лесистости $\beta$	1961—1973	0,35	0,35	0,35	
Параметр	1961—1973	$\alpha_{o, n}$	7,72	7,72	7,72
		$\alpha_{o, n}$	5,67	5,67	5,67
Гамма-распределение	1961—1973	$\Gamma(\alpha_o)_n$	2780	2780	2780
		$\Gamma(\alpha_o)_n$	68, 97	68, 97	68, 97
Коэффициент размерности $K_Q$	1961—1973	225	225	225	
Параметры кривой добегания	1961—1965	$n_n$	3,1	3,6	—
		$n_n$	3,3	3,5	—
		$\tau_n$	2,5	2,2	—
		$\tau_n$	0,6	0,5	—
		$n$	—	—	2,2
		$\tau$	—	—	2,5
		$\tau$	—	—	—
Параметр $P_{(m)}, n/P_{(m)}, n$	1961	23/123	52	52	
	1962	18/206	66	66	
	1963	4/126	25	25	
	1964	85/590	143	143	
	1965	103/800	193	193	
	1966	29/160	66	66	
	1967	54/500	110	110	
	1968	99/405	163	163	
	1969	59/600	136	136	
	1970	58/221	95	95	
	1971	3/450	21	21	
	1972	25/205	57	57	
	1973	47/330	101	101	
Грунтовая составляющая $Q_{гд}$	1961	101	101	101	
	1962	28	28	28	
	1963	19	19	19	
	1964	21	21	21	
	1965	36	36	36	
	1966	61	61	61	
	1967	26	26	26	
	1968	23	23	23	
	1969	19	19	19	
	1970	35	35	35	
	1971	65	65	65	
	1972	22	22	22	
	1973	19	19	19	

Примечание. Параметрам  $n$  и  $\tau$  соответствуют кривые добегания, ординаты которых помещены в прил. 1.

Бассейн водохранилища  
 $F = 19440 \text{ км}^2$   
 $K_q = 225$

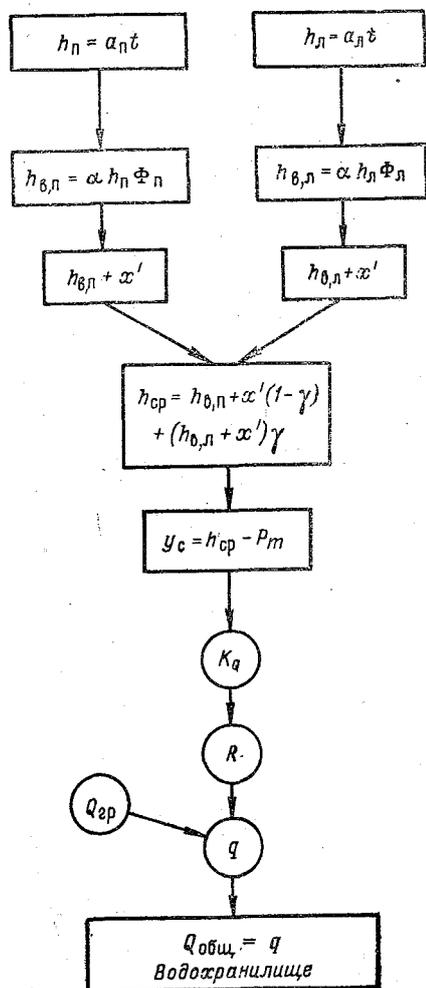


Рис. 13. Блок-схема прогноза притока воды в Угличское водохранилище (площадь водосбора 19440 км<sup>2</sup>, K<sub>q</sub> = 225).

Параметры и константы, необходимые для расчета гидрографа притока в Угличское водохранилище по трем вариантам модели, были определены по способам, изложенным в разд. 1. Полученные параметры и константы приведены в табл. 13. Здесь следует подчеркнуть, что параметры P<sub>(m)</sub>, л и P<sub>(m), л</sub> были определены по такому же способу, что и P<sub>(m)</sub> для других вариантов модели, т. е. исходя из уравнения (18). Однако для этих целей использованы приходные и расходные элементы водного баланса отдельно для поля и леса, вычисленные по методике, изложенной в работе [5]. Эта методика позволяет приближенно расчленить интегральный сток бассейна на две составляющие (полевую и лесную), исходя из условия, что после расчленения их сумма (с учетом коэффициента залесенности бассейна) должна быть равна интегральному стоку.

С учетом изложенного были произведены расчеты гидрографов притока воды в водохранилище по трем вариантам (1961—1973 гг.), а затем сделана оценка результатов расчетов для каждого года в отдельности и осредненная.

Оценка результатов производилась исходя из степени совпадения рассчитанных и фактических расходов воды. За критерий качества совпадения приняты значения средних квадратических отклонений S вычисленных по выражению (25). Средние статистические оценки указанных расчетов приведены в табл. 14.

Анализ результатов расчетов показал следующее:

— все три варианта дают удовлетворительных результаты, причем их оценки мало отличаются друг от друга;

— применительно к рассматриваемому водохранилищу при существующей точности исходных данных детализация расчетов гидрографа половодья по полной модели не дает заметных уточнений по сравнению с упрощенными вариантами.

### 3.2.4. Принятая схема прогноза.

Поскольку варианты полной модели дали практически одинаковые результаты по сравнению с упрощенной, было признано целесообразным рекомендовать для выпуска прогноза наиболее простую модель. На основе упрощенной модели была построена блок-схема прогноза, показанная на рис. 13. Технология составления прогноза ежедневного притока в водохранилище по этой схеме заключается в следующем. По данным о запасах воды в снежном покрове перед снеготаянием, а также по фактической и ожидаемой информации о температуре воздуха и осадках на 5 сут вперед по упрощенной модели производится расчет ежедневных значений подачи воды и водоотдачи бассейна, а затем с помощью функций влияния рассчитывается приток в водохрани-

Таблица 14

## Оценка результатов расходов притока воды в водохранилище по различным вариантам модели

Характеристика	Полная модель		Неполная (упрощенная) модель
	I вариант	II вариант	
Среднее квадратическое отклонение рассчитанных значений притока от фактических $S$ м <sup>3</sup> /с для подъема половодья	185	215	173
спада половодья	102	117	103
всего половодья	136	153	132
5 сут	176	208	170
Среднее квадратическое отклонение значений притока за 5 сут от нормы $\sigma_{\Delta}$ м <sup>3</sup> /с	346	346	346
Отношение $S/\sigma_{\Delta}$ для 5 сут	0,50	0,60	0,49

Таблица 15

## Индексы осеннего увлажнения водосбора Угличского водохранилища

Год	$u_1$	$u_2$	$u_3$	$u_4$	Год	$u_1$	$u_2$	$u_3$	$u_4$
1951	303	190	202	—	1963	215	166	166	210
1952	104	34	40	—	1964	168	48	58	595
1953	328	340	310	—	1965	219	49	64	550
1954	333	272	211	—	1966	218	137	163	310
1955	274	120	127	—	1967	186	47	54	510
1956	130	38	45	—	1968	229	67	79	385
1957	301	196	192	—	1969	284	52	58	555
1958	258	120	129	—	1970	226	156	180	280
1959	258	134	130	—	1971	205	91	115	290
1960	169	52	59	—	1972	229	114	120	335
1961	345	259	313	—	1973	301	52	64	360
1962	195	57	74	435					

Примечание.  $u_1$  — увлажнение, равное сумме осадков с I/VIII до установления устойчивого снежного покрова, сложенной с поступлением воды на водосбор в период зимних оттепелей;  $u_2$  — сумма средних месячных расходов воды трех створов Большие Сетки (р. Медведица), Подол (р. Нерль) и Вербилки (р. Дубна) за период октябрь—февраль;  $u_3$  — сумма средних месячных расходов воды трех створов, использованных для  $u_2$ , взятых с соответствующими коэффициентами;  $u_4$  — уровни грунтовых вод по скважине № 202 (г. Торжок).

лище за счет поверхностного стока. Далее к нему добавляется грунтовая составляющая и получается общий ежедневный приток, который корректируется по методике, изложенной в разд. 1 настоящих Указаний. Корректировка прогноза делается автоматически в процессе расчетов, производимых на ЭВМ БЭСМ-6 при каждом выпуске прогнозов.

При этом на печать выдаются не только прогнозы притока воды на каждые сутки от 1 до 5 сут, но также и значения всех составляющих водного баланса, включая интенсивность снеготаяния, покрытость бассейна снегом, водоотдачу снега, водоотдачу бассейна, потери, добегание воды до замыкающего створа.

Как уже указывалось ранее, для рассматриваемой методики прогноза необходимо перед началом снеготаяния определить параметр  $P_{(m)}$ , который, как известно, вычисляется по выражению (18), исходя из долгосрочного прогноза объема

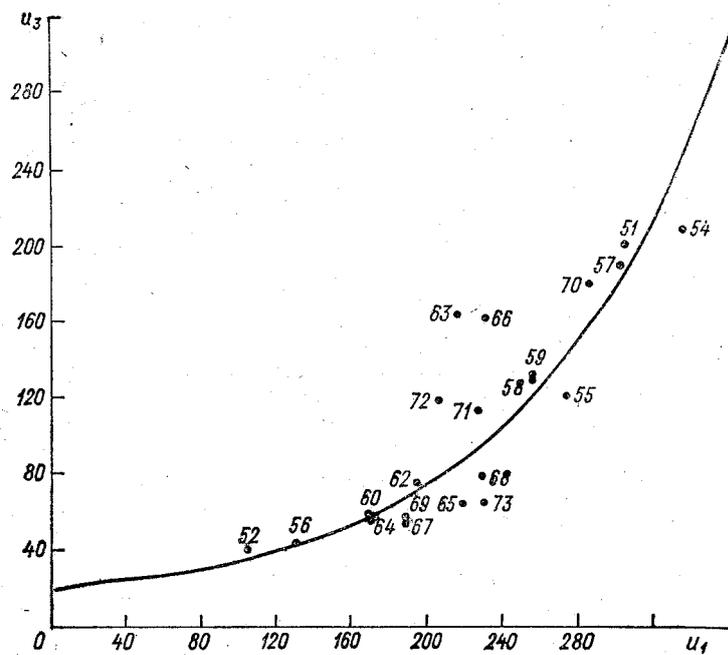


Рис. 14. Связь между индексами осеннего увлажнения водосбора Угличского водохранилища  $u_1$  и  $u_3$ .  
Цифры у точек — две последние цифры года.

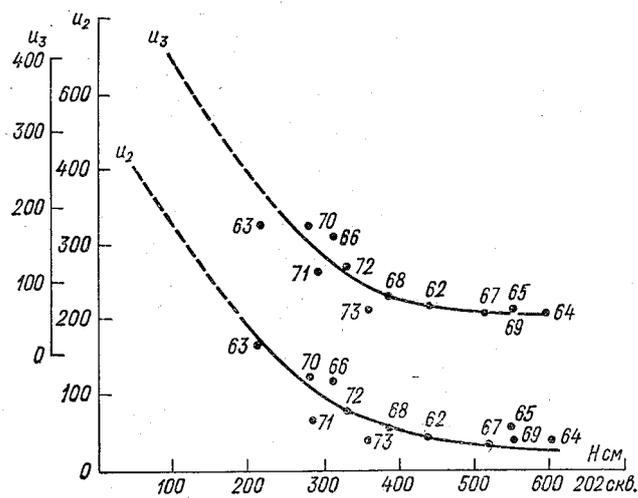


Рис. 15. Связь индексов осеннего увлажнения водосбора Угличского водохранилища  $u_2$  и  $u_3$  с уровнями грунтовых вод в скв. № 202 (г. Торжок).  
Цифры у точек — две последние цифры года.

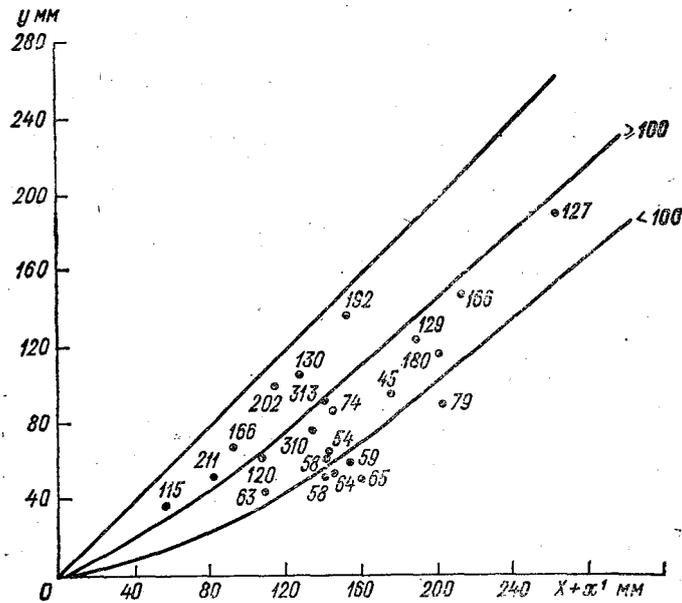


Рис. 16. Зависимость стока за половодье от запасов воды в снежном покрове, сложенных с осадками за период снеготаяния, для района I Иваньковского водохранилища. Цифры у точек — две последние цифры года и значения индекса  $m = u_3$  для района II.

половодья. При этом можно воспользоваться прогнозом, выпускаемым по любой существующей надежной методике для периода половодья или по методике, разработанной специально для рассматриваемой цели. В данном случае для Угличского водохранилища на основе воднобалансовых и других характеристик бассейна разработана специальная методика. Она базируется на связи между стоком за половодья  $y$ , снегозапасами  $x$ , сложенными с осадками за период снеготаяния  $x'$ , и значениями индекса осеннего увлажнения  $m$ .

При разработке этой методики было испытано несколько индексов осеннего увлажнения, сведения о которых приведены в табл. 15.

Анализ различных индексов показал, что они практически взаимозаменяемы, что хорошо видно на рис. 14 и 15. Однако для водосбора Угличского водохранилища целесообразно использовать индексы  $u_2$  и  $u_3$ , так как их расчет весьма прост и они дают одинаковые результаты по сравнению с другими индексами. В конечном счете для рассматриваемых целей в качестве  $m$  принят индекс  $u_3$ .

С учетом  $m$  построена зависимость

$$y = f(X + x', m),$$

представленная на рис. 16. Она является основой для определения параметра  $P_{(m)}$  для талого стока.

Изложенная методика используется при прогнозе притока воды в Угличское водохранилище начиная с 1979 г. Опыт показал, что точность этих прогнозов в основном удовлетворительная. Вместе с тем нередко ошибки прогнозов превышают допустимые.

Несмотря на указанное, изложенный метод рекомендован к использованию, так как для условий Угличского водохранилища на сегодняшний день это пока единственный методический подход, позволяющий составлять прогноз ежедневного притока воды с заблаговременностью до пяти суток.

### 3.3. Прогноз притока воды в Горьковское водохранилище по снеготаянию и расходам воды малых рек

3.3.1. Краткая характеристика бассейна и водохранилища. Площадь водосбора Горьковского водохранилища на участке Волги от Рыбинской ГЭС до Горьковской ГЭС составляет 79 000 км<sup>2</sup>, не считая собственно зеркала водохранилища, имеющего площадь 1751 км<sup>2</sup>.

Боковой приток воды к Горьковскому водохранилищу поступает в основном с левобережной части водосбора, где речная сеть достаточно развита и где впадают наиболее крупные на данном участке Волги притоки — реки Кострома, Немда и Унжа. Реки правобережья сравнительно малы, за исключением р. Которосли, водосбор которой имеет площадь 6410 км<sup>2</sup>.

Водосбор Горьковского водохранилища отличается большой лесистостью, особенно в левобережной части. Распределение лесов по территории неравномерное: залесенность водосборов небольших рек колеблется от 31 до 85 %. Заболоченная площадь значительно превышает площадь озер и прудов. Что касается распаханности, то для большинства малых рек она составляет 20—30 %, однако бассейны основных рек — Унжи, Немды, Костромы и Которосли, — занимающие больше половины всего водосбора водохранилища, не распаханы вовсе.

Почвы на большей части водосбора Горьковского водохранилища слабопроницаемые, глинистые и суглинистые, лишь в южной части бассейна Унжи подзолистые, песчаные и супесчаные. Годовое количество осадков в бассейне в среднем составляет около 550 мм, в зимнее время — 110—190 мм, в период весеннего половодья — около 55 мм. Таким образом, в некоторые годы в период половодья осадки могут весьма существенно влиять на объем и распределение стока.

Максимум снеготаяния наступает 20—25/III. Таяние снега обычно начинается в конце марта — начале (в первой декаде) апреля, а сход снежного покрова заканчивается в поле во второй — третьей декаде апреля, в лесу — в первой декаде мая.

Весеннее половодье начинается в первой декаде апреля и заканчивается к началу июня. На спаде весеннего половодья часто имеют место напластования дождевых паводков.

Одной из характерных особенностей водосбора Горьковского водохранилища является Костромская низина, представляющая собой сезонный аккумулярующий водоем, — в весенний период низина заполняется водой.

3.3.2. Районирование бассейна водохранилища и исходные данные. В бассейне Горьковского водохранилища выделено 14 районов. Водосбор водохранилища сильно асимметричен: левобережная часть занимает площадь 63 200 км<sup>2</sup> (80 %), а правобережная — 15 800 км<sup>2</sup> (20 %). Десять районов находятся на левобережье водохранилища и лишь четыре — на правобережье (рис. 17). В зависимости от характера гидрографической сети в каждом из 14 районов выбраны один или несколько створов, замыкающих речную сеть малых бассейнов. Эти створы являются исходными для составления прогноза притока воды в водохранилище. Из суммы объединенных створов образуется условный (районный) створ, для которого и составляется прогноз по снеготаянию. Например, в первом районе суммарный расход по шести бассейнам рек, общей площадью 2146 км<sup>2</sup>, с помощью площадного коэффициента  $K_{f_1} = 2,19$  и поправочного коэффициента на густоту речной сети  $K_L = 0,87$  распространяется на общую площадь района  $F = 4 700$  км<sup>2</sup>.

Для составления прогноза требуются следующие исходные данные:

- а) средняя суточная температура воздуха и  $\sigma$ ;
- б) суточные суммы осадков в период снеготаяния по метеостанциям, перечисленным в табл. 16;
- в) ежедневные расходы воды по створам рек, помещенным в табл. 16.

Константы, необходимые для расчета, даны в табл. 17. Коэффициенты таяния для поля  $a_n = 4$  мм/°С и для леса  $a_n = 2$  мм/°С неизменны год от года и приняты одинаковыми для всех районов водохранилища. Постоянными год от года для каждого района являются следующие параметры:  $\gamma$  — коэффициент лесистости;  $\alpha$  — параметр, характеризующий кривую распределения снежного покрова; гамма-распределение  $\Gamma(\alpha)$ ;  $K_Q$  — коэффициент перехода от слоя талого стока  $u$  (мм) к расходам воды в замыкающих створах бассейнов (районов)  $Q$  (м<sup>3</sup>/с).

Остальные константы определяются ежегодно. Для определения параметра  $P_{(m)}$  каждого района построены зависимости  $P_{(m)}$  от значения индекса осеннего

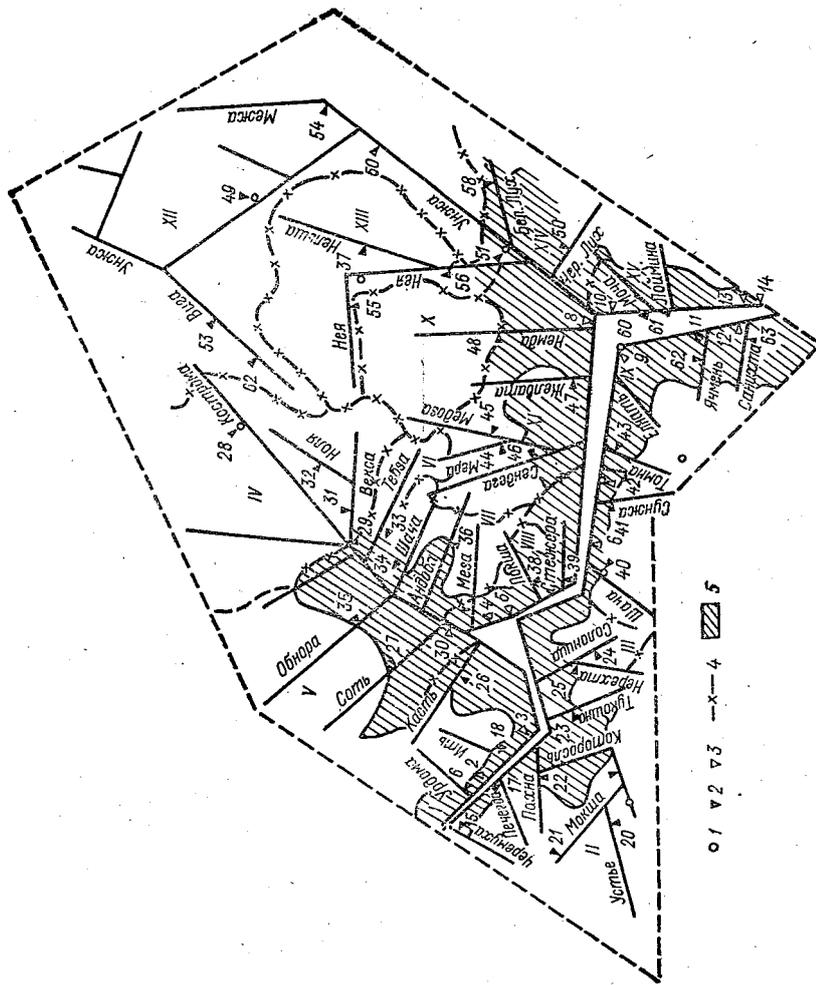


Рис. 17. Схема районирования бассейна Горьковского водохранилища (без привязки к местности).  
 1 — метеостанция; 2 — пост. учитывающий сток; 3 — уровеньный пост; 4 — граница районов;  
 5 — площадь района, не освещенная наблюдениями.

Список гидрометрических створов и метеостанций, данные которых используются при составлении прогноза притока воды в Горьковское водохранилище

№ района	Река-пункт	Метеорологические станции
I.	Ить — Нестерово Касть — Рылово Урдома — Белятино Черемуха — Дмитриевка Печегда — Чебаково	Данилов, Тутаев, Ярославль
II	Пахна — Богослов Которосль — Гаврилов Ям	Переяславль Залесский, Ростов, Ярославль
III	Солоница — Бортниково Туношна — Орлецы Нерехта — Нерехта	Приволжск, Кострома, Ярославль
IV	Кострома — Буй	Чухлома, Буй, Галич
V	Обнора — Шарна Соть — Верхний Жар	Буй, Данилов
VI	Табза — Борок Шача — Рябцево Андоба — Любимцево	Буй, Галич, Островское
VII	Межа — Ямково Покша — Рыжково Стежера — Шолохово	Кострома, Островское
VIII	Сунжа — Новописцово Шача — Приволжск	Иваново, Приволжск, Лух, Кинешма
IX	Немда — Селище	Николо-Полома, Островское, Макарьев, Галич
X	Мера — Малое Березово Медоза — Заборье Сендега — Покровское Желвата — Кельи	Островское, Кинешма
XI	Нея — Буслаево	Николо-Полома, Галич, Чухлома
XII	Черный Лух — Юрово Белый Лух — Тимошино	Макарьев, Юрьево
XIII	Межа — Загатино	Никольск, Екимцево, Мантурово
XIV	Унжа — Кологрив	

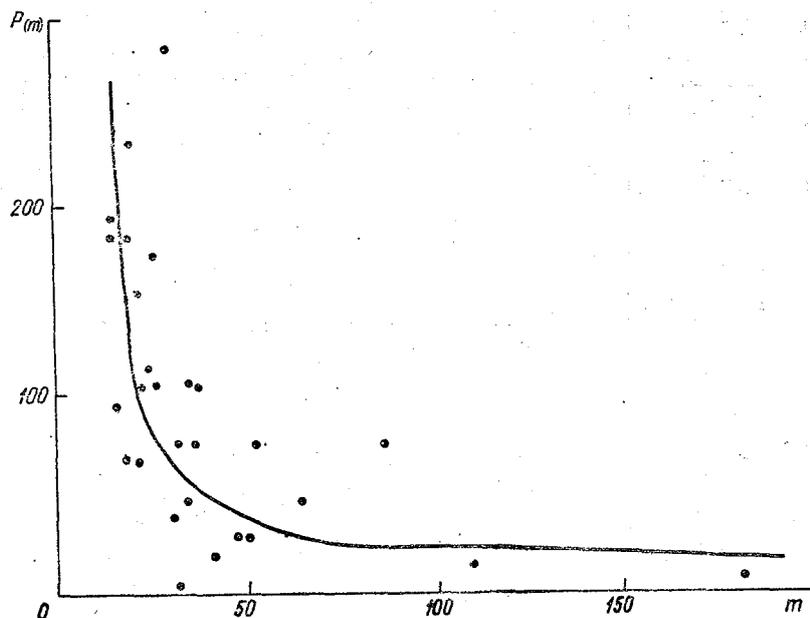


Рис. 18. Зависимость параметра  $P(m)$  от индекса осеннего увлажнения  $m$  для района XIII Горьковского водохранилища.

увлажнения  $m$  (определяется как сумма расходов за сентябрь—ноябрь предшествующего года) и лесистости  $\gamma$ .

На рис. 18 показана зависимость  $P(m)=f(m)$  для района XIII.

Все исходные данные, а также константы  $X$  и  $\rho$  берутся средними по району в соответствии со списком метеостанций и постов (см. табл. 16). Осреднение производится на ЭВМ. Константы  $P(m)$  и  $\beta$  вычисляются как средние взвешенные при условии, если в данный район входит несколько створов малых рек.

Для выпуска прогноза на 5 сут вперед требуется исходная информация за 30 сут, которая включает данные за 25 сут, предшествующих дате выпуска прогноза, и за 5 сут прогнозируемые величины. Отрезок времени 30 сут выбран, исходя из максимального числа ординат кривых добегания.

**3.3.3. Схема прогнозов (расчетов).** Блок-схема (рис. 19) предусматривает составление прогноза притока в водохранилище с учетом 14 районов. В зависимости от характера гидрографической сети в каждом районе выбраны один или несколько створов, замыкающих речную сеть малых бассейнов. Эти створы являются исходными для составления прогноза притока воды в водохранилище. Согласно блок-схеме производится расчет водоотдачи для каждого из частных районов (раздельно с открытой и лесной площадями бассейна), а затем с помощью раздельных же функций влияния (поле—лес) производится расчет талого стока в замыкающем (реальном или условном) створе района. Полученный расход путем введения коэффициента распространяется на всю площадь района и доводится до входного створа в водохранилище с помощью частных кривых добегания. Эти расходы затем суммируются, и таким образом составляется прогноз притока воды в водохранилище.

Кроме суммарного притока воды в водохранилище, рассчитываются расходы по каждому району в отдельности. Блок-схемой предусматривается использование 37 кривых добегания. Из них 26 необходимы при расчете добегания талого стока до замыкающих створов 13 районов, а остальные являются кривыми руслового добегания вод от входных створов до водохранилища. Значения ординат кривых добегания приведены в прил. 1.

Таблица 1  
Константы для расчета снеготаяния по 13 районам Горьковского водохранилища

№ района	Река — пункт	Название участка	Коэф-ци-ент ставания $\alpha$	Коэф-ци-ент лесности $\gamma$	Коэф-ци-ент распределения $\alpha$	Гамма-распределение $\Gamma(\alpha)$	№ максималь-ной ординаты кривой добе-гания	Коэф-ци-ент пе-рехода от слоя стока к расходу $KQ$	Запас воды в снеге $X_{\text{макс}}$	Плот-ность снеж-ного покрова $\rho$	Осен-нее увлаж-нение $m$	Потей талог стоки $P$
I	Ить — Нестерово Касть — Рылово Урдома — Белятино Черемуха — Дмитриевка Печегда — Чебаково	Поле Лес	4 2	0,50 0,50	6,94 6,25	643,6 184,8	4 1	29,4				
II	Пахна — Богослов Которосль — Гаврилов Ям	Поле Лес	4 2	0,60 0,40	6,94 6,25	643,6 184,8	9 7	56,2				
III	Солоница — Боргниково Туношна — Орлецы Нерехта — Нерехта	Поле Лес	4 2	0,62 0,38	6,94 6,25	643,6 184,8	9 7	56,2				
IV	Кострома — Буй	Поле Лес	4 2	0,25 0,75	5,67 7,72	68,97 2780	9 5	103				
V	Обнора — Шарна Соть — Верхний Жар	Поле Лес	4 2	0,32 0,68	6,25 6,94	184,8 643,6	8 5	28,7				
VI	Табза — Борок Шача — Рябцево Андоба — Любимцево	Поле Лес	4 2	0,47 0,53	6,25 6,94	184,8 643,6	6 3	25,2				

VII	Межа — Ямково Пока — Рыжково Стежера — Шолохово	Поле	4	0,56	6,94	643,6	3	18,0
		Лес	2	0,44	6,25	184,8	2	
VIII	Сунжа — Ново-Писцово Шача — Приволжск	Поле	4	0,64	6,94	643,6	2	10,7
		Лес	2	0,36	6,25	184,8	1	
IX	Немда — Селище	Поле	4	0,30	5,67	68,97	5	43,0
		Лес	2	0,70	7,72	2780	3	
X	Мера — М. Березово Мелоза — Заборье Желвата — Кельи Сендега — Покровское	Поле	4	0,25	5,67	68,97	3	16,6
		Лес	2	0,75	7,72	2780	4	
XI	Нея — Буслаево	Поле	4	0,20	5,67	68,97	2	66,1
		Лес	2	0,80	7,72	2780	5	
XII	Черный Лух — Юрово Белый Лух — Тимошино	Поле	4	0,12	5,67	68,97	5	10,5
		Лес	2	0,88	7,72	2780	2	
XIII	Межа — Загатино	Поле	4	0,20	5,67	68,97	4	24,5
		Лес	2	0,80	7,72	2780	5	

Примечание. В графах 10—13 — константы, изменяющиеся от года к году.

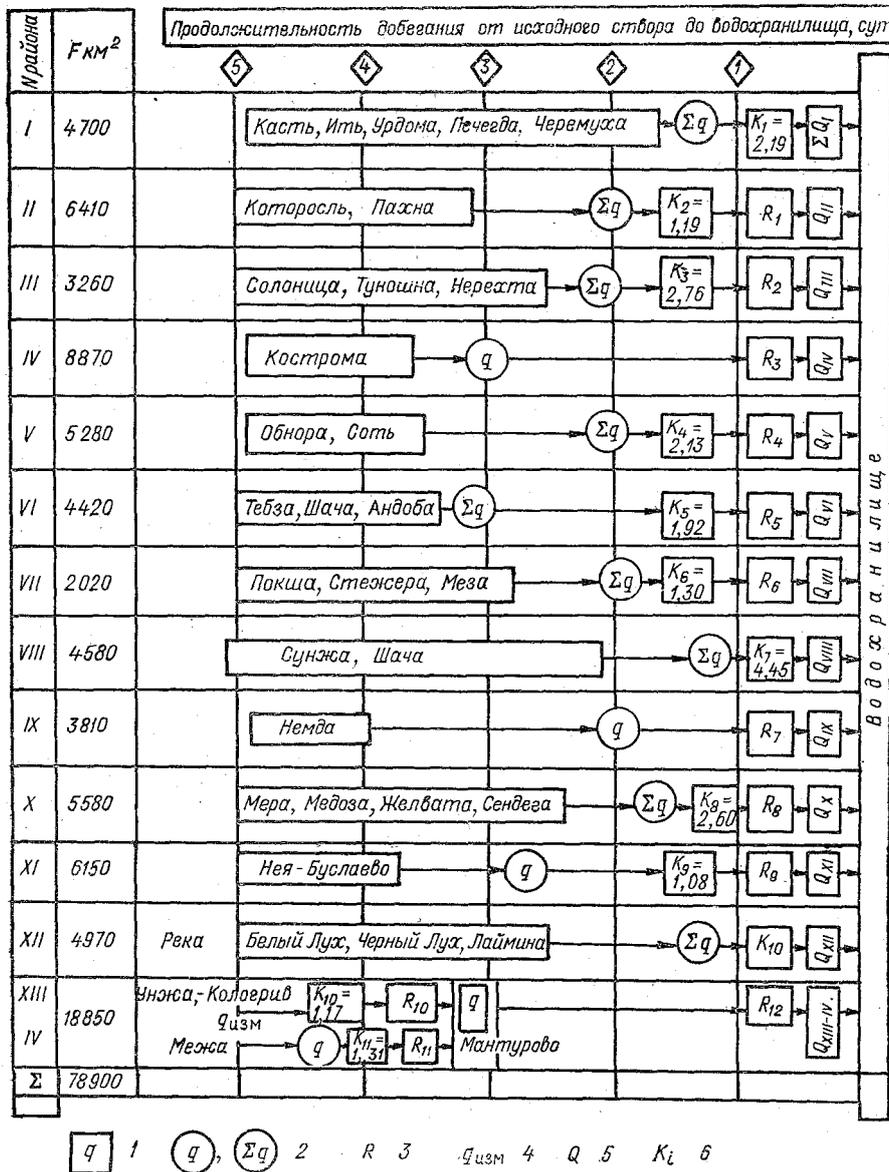


Рис. 19. Блок-схема прогноза притока воды в Горьковское водохранилище.  
 1 — расход, полученный по прогнозу в промежуточном пункте; 2 — расход, рассчитанный по снеготаянию для реального (одного) или условного (суммарного) створа; 3 — индекс функции влияния; 4 — измеренный расход воды; 5 — прогнозируемый расход во входном створе водохранилища; 6 — коэффициент, учитывающий соотношение освещенных и не освещенных наблюдениями площадей и различия в густоте речной сети.

## 4. СХЕМА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ВЫПУСКА ПРОГНОЗА ПРИТОКА ВОДЫ В КАСКАД ВОДОХРАНИЛИЩ (НА ПРИМЕРЕ р. ВОЛГИ)

### 4.1. Общие замечания

На основе изложенной в разд. 1 методики и разработанной Е. П. Чемеренко [13] системы алгоритмов и программ для автоматической обработки на ЭВМ оперативной гидрологической информации весной 1975 г. в Гидрометцентре СССР впервые в оперативной практике Советского Союза была применена автоматизированная система выпуска прогнозов расходов воды в период весеннего половодья для значительной части Волжско-Камского бассейна общей площадью 800 тыс. км<sup>2</sup>, включающей бассейны Горьковского и Куйбышевского водохранилищ. Опыт автоматизированного выпуска прогноза обобщен в работе [6].

С 1977 г. начали составляться прогнозы притока воды к Рыбинскому водохранилищу с площадью бассейна 66 600 км<sup>2</sup>, а в 1979 г. в общую схему прогноза притока воды к водохранилищам Волжско-Камского каскада были подключены Ивановское и Угличское с площадью 54 220 км<sup>2</sup> (рис. 20).

К настоящему времени система позволяет в автоматизированном режиме рассчитывать фактический ежедневный приток к каждому из шести водохранилищ; выпускать прогнозы ежедневного притока с заблаговременностью 5 сут в основные водохранилища Волжского каскада, включая Ивановское, Угличское, Рыбинское, Горьковское, Куйбышевское и Нижнекамское, одновременно с этим выпускать прогнозы ежедневных расходов воды с указанной заблаговременностью рек Волги, Камы и Вятки соответственно у створов Старицы, Чебоксары, Набережные Челны и Вятские Поляны, производить расчеты по 32 частным водосборам суточного хода снеготаяния и других переменных, характеризующих процессы на бассейне, включая динамику покрытости снегом, даты схода снежного покрова в поле и в лесу, интенсивность поступления талой и дождевой воды в период снеготаяния, интенсивность водоотдачи бассейна.

Из сказанного видно, что, помимо конечных результатов в виде фактических и прогнозируемых значений притока воды в водохранилища и расходов воды крупных рек, система выдает большой объем дополнительной информации, которая может быть использована для практических целей.

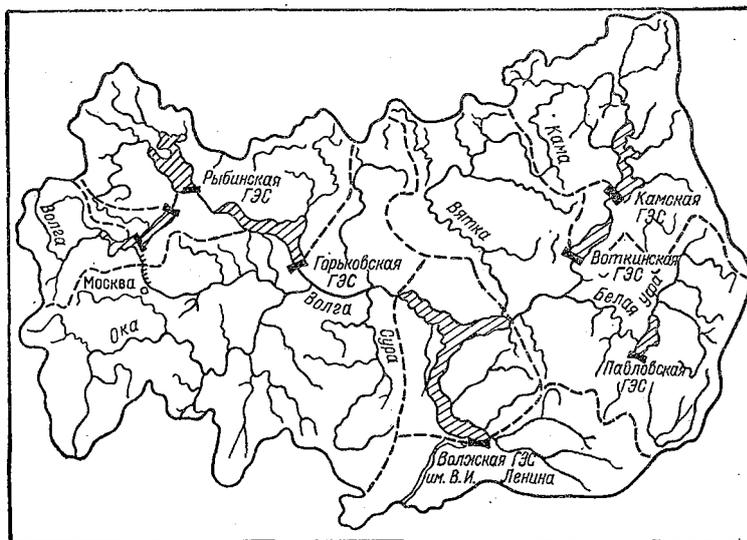


Рис. 20. Схема Волжско-Камского каскада водохранилищ.

Рассматриваемая автоматизированная система состоит из комплекса программ, осуществляющих подготовку исходной информации для прогноза, включая опознавание и раскодировку поступивших гидрологических сообщений, формирование массивов температуры, осадков и расходов с их первичным контролем и предвычислением на 5 сут, реализацию методов расчетов и прогнозов весеннего притока воды в крупные водохранилища и расходов воды в замыкающих створах рек, основанных на математических моделях.

#### 4.2. Исходные данные для разработки схемы и выпуска прогнозов

В качестве исходных данных для прогноза используется информация, поступающая ежедневно из местных управлений по гидрометеорологии и контролю природной среды (УГКС) в виде телеграфных сводок о метеорологических элементах (температура воздуха и осадки) и о расходах воды в створах рек. Всего для выпуска прогноза привлекаются данные по 121 гидрологическому посту и 85 метеорологическим станциям. При каждом выпуске прогнозов эта информация раскодируется, осуществляется ее первичный контроль, осредняется по суточным интервалам времени, а также по отдельным районам водосборов.

Для перехода на автоматизированную систему обработки информации, включающую и выпуск прогнозов, были разработаны новые коды для передачи информации по каналам связи о водном и ледовом режимах и о снежном покрове [13]. Основное отличие новых кодов от прежних заключается в полной замене всех словесных сообщений цифровыми.

Требования к информации более жесткие, чем к используемой в традиционных методах прогнозов. Объясняется это в первую очередь тем, что все этапы обработки данных выполняются на ЭВМ, без вмешательства человека. Объем гидрологической и метеорологической информации должен соответствовать данным табл. 18.

Таблица 18

Объем ежедневной гидрологической информации, требуемой для расчетов и прогнозов притока воды в водохранилища

Водохранилище	Количество гидропостов и метеостанций, дающих информацию о ежедневных расходах воды		
	для расчета фактического притока	для прогноза притока	об осадках и температуре воздуха
Иваньковское	5	1	11
Угличское	4	—	7
Рыбинское	16	—	15
Горьковское	32	29	19
Куйбышевское	64	47	33
Итого	121	77	85

Примечание. Метеорологическая информация выбирается из общих сводок, поступающих в Гидрометцентр СССР для численных прогнозов погоды.

#### 4.3. Обработка информации на ЭВМ

При автоматизированном выпуске прогнозов весеннего половодья оперативная гидрологическая информация подвергается обработке на ЭВМ от приема данных с каналов связи до собственно выпуска прогнозов. Этой цели служит созданное программное обеспечение, которое осуществляет как первичную обработку исходной информации, так и реализацию численных схем гидрологических прогнозов.

Первичная обработка включает в себя следующие элементы:

— опознавание сводок и отдельных сообщений, поступающих в Гидрометцентр СССР в общем потоке информации;

- определение типа кода;
- опознавание даты и срока;
- определение передающей станции (название, местоположение);
- контроль сообщений в целях обнаружения ошибок, связанных с процедурой передачи данных;

- раскодирование телеграмм;
- размещение раскодированных телеграмм в памяти ЭВМ;
- преобразование информации к виду, удобному для дальнейшей обработки.

Таким образом, в результате первичной обработки раскодированная информация заносится в память ЭВМ (как правило, внешней) в виде так называемых макетов телеграмм, в которых каждый элемент информации хранится в определенном, удобном для использования виде на закрепленном за ним месте в макете.

В результате ошибок при составлении и передаче сводок и телеграмм часть информации может оказаться недоступной для раскодировки с помощью ЭВМ. Путем усложнения программ раскодировки можно постепенно увеличить число верно распознаваемых сообщений, однако существенное усложнение алгоритмов и программ раскодировки будет приводить к незначительному увеличению количества опознанной информации. Поэтому следует добиваться компромисса между сложностью программы и качеством распознаваемых и исправляемых ошибок в сообщениях.

Согласно отечественным и зарубежным данным, автоматизированные системы первичной обработки правильно распознают около 95 % информации, доступной раскодировке вручную.

При разработке системы автоматического выпуска прогноза по комплексной гидрометеорологической схеме, кроме создания алгоритмов и программ для обработки данных по гидрологии, предусматривается также специальный блок, с помощью которого производится выбор нужных данных по метеорологии.

При составлении прогноза расчет процессов производится с какого-то начального момента времени  $T_0$ . Поэтому исходная информация представляется в виде удлиняющихся рядов. Таким образом, программа предусматривает последовательное накопление и хранение данных в течение некоторого периода времени.

В тех случаях, когда информация о расходах с постов отсутствует, ЭВМ восстанавливает их значения путем экстраполяции по расходам воды за двое предшествующих суток.

При выпуске прогнозов весеннего стока рек на основе модели снеготаяния используются данные о температуре и осадках на пять суток вперед. Следует отметить, что автоматическое восстановление расходов, а также прогноз температуры воздуха существенно повышают оправдываемость прогнозов. Однако при этом в прогноз могут быть внесены дополнительные ошибки. Поэтому указанные процедуры должны осуществляться с учетом опыта и знаний специалиста.

#### 4.4. Общая схема прогноза

Схема прогноза комплексная. Для одной части створов прогноз составляется по метеорологическим данным на основе расчетов снеготаяния и факторов стока, определяемых снеготаянием, потерями воды и процессами ее регулирования речными бассейнами. Для другой части створов прогнозы основаны на расчетах трансформации волн паводков при условии, что от входных створов до замыкающих время добегания составляет не менее пяти суток.

Общая, весьма упрощенная блок-схема прогноза показана на рис. 21. Она дает лишь общее представление о сложности выпуска подобных прогнозов.

На схеме видно последовательное расположение водохранилищ и впадающих в них рек, соответственно выполняется расчет и выдача результатов, начиная с Иваньковского водохранилища и кончая Куйбышевским.

Константы для расчета аналогичны описанным в примерах расчета притока воды в отдельные водохранилища.

Результаты расчетов выводятся на АЦПУ в виде таблиц. В системе предусмотрено использование трех режимов выдачи результатов:

- режим краткой выдачи, при котором на печать выдаются выходные гидрографы в замыкающих и промежуточных створах, а также рассчитанный и прогнозируемый приток в водохранилища;
- режим средней выдачи, при котором помимо результатов краткого режима

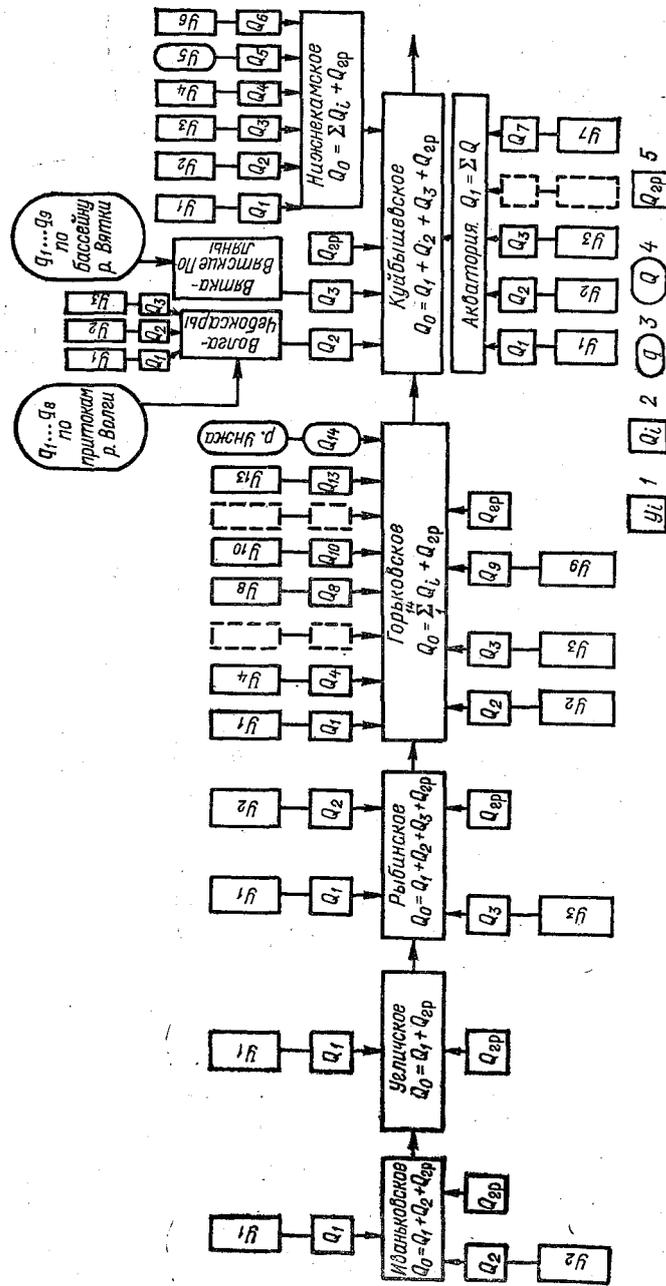


Рис. 21. Общая блок-схема автоматизированного прогноза притока воды для каскада водохранилищ. 1 — частные бассейны, для которых водоотдача вычисляется по снеготаянию; 2 — фактические расходы верхних створов; 3 — фактические расходы верхних створов; 4 — расходы, вычисляемые по данным о стоке верхних створов; 5 — расходы грунтовых вод.

печатаются промежуточные параметры снеготаяния для всех районов на дату выпуска прогноза и на 5 сут вперед;

— режим полной выдачи, обеспечивающий печать всей исходной гидрологической и метеорологической информации с результатами расчета снеготаяния и прогноза за весь период от начала половодья. Полная выдача позволяет анализировать всю исходную информацию и результаты расчетов за весь период половодья. Такой анализ позволяет корректировать прогнозы с учетом опыта и знаний специалиста. Практика показывает, что обычно прогнозы, скорректированные специалистами, имеют более высокую оправдываемость по сравнению с теми, которые выдаются непосредственно ЭВМ. В прил. 2 приведена выдача результатов на АЦПУ.

## 5. ВЫВОДЫ

1. В настоящих Указаниях изложены рекомендации по разработке методов краткосрочных прогнозов расходов воды рек, а также ежедневного притока воды в водохранилища в период половодья.

Следует подчеркнуть, что эти рекомендации целесообразно использовать прежде всего там, где традиционные подходы не дают положительных результатов.

Опыт показывает, что описанные в Указаниях методические подходы обеспечивают удовлетворительную точность прогнозов для следующих бассейнов;

а) с устойчивым снежным покровом сформировавшимся к началу снеготаяния, и сравнительно небольшими жидкими осадками, выпадающими после схода снежного покрова с бассейна, т. е. на спаде половодья;

б) частично залесенных, полностью залесенных или открытых, причем бассейны с коэффициентами лесистости 0,85 следует рассматривать при таких расчетах как полностью залесенные, а при коэффициенте 0,15 — как открытые;

в) рек и водохранилищ, имеющих различные размеры площадей. При этом обычно на бассейнах с площадью, превышающей 20—30 тыс. км<sup>2</sup>, выделяются частные водосборы, которые затем объединяются в единую прогностическую схему.

2. Излагаемые рекомендации предполагают, что основные работы, связанные с созданием прогностических схем для рек и водохранилищ на основе снеготаяния, а также с выпуском прогнозов, производятся только на ЭВМ. При этом ввод исходных данных для выпуска прогноза может осуществляться как при помощи перфокарт, так и автоматически.

Из опыта следует, что прогностические схемы могут быть разработаны также для крупных речных систем, таких, например, как Волга. В этом случае краткосрочные прогнозы половодья выпускаются одновременно как для каскада водохранилищ, так и для створов многих небольших и средних рек, т. е. с учетом требований различных отраслей народного хозяйства. Немаловажным является также и то, что помимо конечных результатов в виде прогнозов расходов воды по многим створам рек одновременно при каждом выпуске этих прогнозов можно выдавать на печать ЭВМ большой объем другой полезной информации, позволяющей следить на бассейне за суточным ходом снеготаяния и основных элементов водного баланса, включая динамику покрытости бассейна снегом, за датами схода снежного покрова в поле и лесу, за интенсивностью поступления на бассейн талой и дождевой воды в период снеготаяния, за суточными общими потерями воды, интенсивностью водоотдачи бассейна, суточными коэффициентами стока.

Эта информация полезна и может быть использована как для научных, так и для практических целей.

3. В настоящих Указаниях даны рекомендации по нескольким моделям талого стока, используемым в качестве основы для разработки методов краткосрочных прогнозов расходов воды рек в период половодья. Эти модели (полная и неполная) отличаются друг от друга детальностью описания процессов снеготаяния, расчета потерь в поле и в лесу, а также добегания талой воды до замыкающего створа реки. Опыт показывает, что при существующих исходных данных, используемых для расчета и выпуска прогнозов расходов воды по различным моделям, пока получаются примерно одинаковые результаты. Поэтому авторы полагают, что в настоящее время для практических целей следует отдавать предпочтение простому, т. е. неполному, варианту модели.

4. Нередко в отдельные дни и даже периоды половодья точность прогнозов, выпускаемых предлагаемым методом, не вполне удовлетворительна. На ошибки прогнозистов оказывает влияние следующее:

— значительные ошибки при вычислении ежесуточного фактического притока воды в водохранилища за отдельные периоды половодья;

— точность оперативной информации о ежедневных расходах воды, которая в период половодья значительно ниже по сравнению с режимными материалами (нередко разница между расходами воды по оперативной и режимной информации для одного и того же створа достигает 100 % и более);

— недостаточный объем оперативной гидрометеорологической информации по сравнению с объемом исходных данных, использованных при разработке метода;

— существенные ошибки при прогнозировании на несколько суток температуры воздуха и осадков;

— недостатки существующих моделей формирования весеннего стока, являющихся основой для построения прогностических схем.

5. Для повышения надежности методов краткосрочных прогнозов расходов воды рек и притока воды в водохранилища в период половодья необходимо совершенствовать следующие существующие схемы:

— раздельного расчета (прогноза) потерь талых и дождевых вод с учетом испарения и фильтрации, а также динамики потерь в период половодья;

— расчета интенсивности снеготаяния в условиях различных физико-географических зон и типов погоды, а также временной аккумуляции воды под снегом и сброса ее в первичную гидрографическую сеть;

— коррекции прогнозируемых расходов воды и значений притока воды в водохранилища с учетом начальных условий.

#### ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Таблица 1

Ординаты кривых добегаания, используемые для расчета (прогноза) расходов воды р. Мологи у Устюжны по трем вариантам модели

№ ординаты	Полная модель		Неполная модель $R_I$	Комбинированная схема	
	$R_{II}$	$R_{II}$		$R_I$ — для талого стока у с. Забережье и Горны	$R_{II}$ — для суммы расходов у с. Забережье и Горны
1	0	0	0,0002	0,0105	0,1808
2	0	0,0166	0,0050	0,0503	0,3764
3	0,0010	0,0663	0,0200	0,0947	0,2616
4	0,0040	0,1229	0,0425	0,1045	0,1192
5	0,0100	0,1564	0,0659	0,1109	0,0432
6	0,0190	0,1593	0,0847	0,1075	0,0137
7	0,0310	0,1400	0,0961	0,0981	0,0039
8	0,0440	0,1106	0,0997	0,0858	0,0009
9	0,0560	0,0807	0,0969	0,0727	0,0002
10	0,0670	0,0554	0,0895	0,0601	0,0001
11	0,0740	0,0363	0,0792	0,0487	
12	0,0780	0,0228	0,0678	0,0388	
13	0,0780	0,0138	0,0565	0,0305	
14	0,0760	0,0082	0,0459	0,0237	
15	0,0710	0,0047	0,0366	0,0183	
16	0,0650	0,0027	0,0286	0,0140	
17	0,0580	0,0015	0,0221	0,0106	
18	0,0510	0,0008	0,0168	0,0080	
19	0,0440	0,0005	0,0126	0,0060	
20	0,0370	0,0002	0,0094	0,0044	
21	0,0300	0,0001	0,0069	0,0033	
22	0,0250	0,0001	0,0051	0,0024	
23	0,0200		0,0037	0,0018	
24	0,0160		0,0026	0,0013	
25	0,0130		0,0019	0,0010	
26	0,0100		0,0013	0,0007	
27	0,0080		0,0010	0,0005	
28	0,0060		0,0007	0,0004	
29	0,0050		0,0005	0,0003	
30	0,0030		0,0003	0,0002	

Таблица II

**Ординаты кривых добегания, использованные для расчета гидрографа  
притока воды в Угличское водохранилище**

№ ординаты	Вариант I		Вариант II		Неполная (упрощенная) модель	№ ординаты	Вариант I		Вариант II		Неполная (упрощенная) модель
	поле	лес	поле	лес			поле	лес	поле	лес	
1	0,0058	0,1782	0,0017	0,2170	0,0413	16	0,0161		0,0187		0,0061
2	0,0370	0,4131	0,0202	0,4649	0,1076	17	0,0123		0,0148		0,0044
3	0,0707	0,2539	0,0501	0,2260	0,1347	18	0,0093		0,0105		0,0031
4	0,0944	0,1047	0,0781	0,0713	0,1356	19	0,0069		0,0078		0,0021
5	0,1059	0,0360	0,0971	0,0170	0,1230	20	0,0052		0,0057		0,0015
6	0,1070	0,0109	0,1056	0,0030	0,1044	21	0,0038		0,0042		0,0011
7	0,1009	0,0031	0,1051	0,0007	0,0852	22	0,0028		0,0030		0,0006
8	0,0905	0,0008	0,0981	0,0001	0,0675	23	0,0021		0,0022		0,0005
9	0,0783	0,0002	0,0874		0,0522	24	0,0015		0,0016		0,0004
10	0,0658	0,0001	0,0750		0,0398	25	0,0011		0,0011		0,0003
11	0,0540		0,0625		0,0298	26	0,0008		0,0008		0,0002
12	0,0436		0,0508		0,0221	27	0,0006		0,0006		
13	0,0346		0,0405		0,0162	28	0,0004		0,0003		
14	0,0271		0,0317		0,0118	29	0,0003		0,0002		
15	0,0210		0,0245		0,0085	30	0,0002		0,0001		

Ординаты кривых добегания для районов Горьковского водохранилища

№ ординаты	R <sub>I</sub>	R <sub>II</sub>	R <sub>III</sub>	R <sub>IV</sub>	R <sub>V</sub>	R <sub>VI</sub>	R <sub>VII</sub>	R <sub>VIII</sub>	R <sub>IX</sub>	R <sub>X</sub>	R <sub>XI</sub>	R <sub>XII</sub>	R <sub>XIII</sub>
1	0,008	0	0,033	0	0,001	0	0,053	0,441	0,002	0,066	0,002	0,023	0,176
2	0,071	0,000	0,133	0,004	0,009	0,004	0,290	0,477	0,037	0,290	0,035	0,097	0,273
3	0,146	0,005	0,185	0,017	0,027	0,027	0,310	0,084	0,102	0,300	0,103	0,148	0,219
4	0,180	0,020	0,182	0,035	0,050	0,073	0,195	0,005	0,159	0,194	0,157	0,160	0,141
5	0,172	0,043	0,149	0,057	0,072	0,152	0,095	0,001	0,177	0,093	0,172	0,145	0,084
6	0,141	0,071	0,111	0,077	0,085	0,155	0,033	0	0,162	0,038	0,159	0,119	0,045
7	0,106	0,095	0,077	0,090	0,095	0,136	0,010	0	0,128	0,015	0,126	0,092	0,027
8	0,071	0,110	0,051	0,095	0,097	0,109	0,003	0	0,095	0,005	0,088	0,067	0,018
9	0,046	0,113	0,033	0,095	0,094	0,079	0,001	0	0,064	0,002	0,062	0,048	0,009
10	0,029	0,110	0,020	0,090	0,087	0,054	0	0	0,042	0,002	0,040	0,032	0,005
11	0,017	0,100	0,012	0,082	0,078	0,034	0	0	0,025	0	0,024	0,022	0,002
12	0,010	0,085	0,007	0,071	0,068	0,021	0	0	0,015	0	0,015	0,015	0
13	0,005	0,069	0,004	0,061	0,058	0,013	0	0	0,009	0	0,008	0,009	0
14	0,002	0,054	0,002	0,051	0,048	0,008	0	0	0,005	0	0,004	0,006	0
15	0,001	0,040	0,001	0,042	0,040	0,005	0	0	0,003	0	0,002	0,004	0
16	0	0,030	0	0,034	0,032	0,004	0	0	0,002	0	0,001	0,002	0
17	0	0,021	0	0,028	0,026	0,002	0	0	0,001	0	0	0,001	0
18	0	0,015	0	0,022	0,020	0,001	0	0	0	0	0	0,001	0
19	0	0,010	0	0,017	0,016	0	0	0	0	0	0	0,001	0
20	0	0,006	0	0,014	0,012	0	0	0	0	0	0	0,001	0
21	0	0,004	0	0,010	0,010	0	0	0	0	0	0	0	0
22	0	0,002	0	0,008	0,007	0	0	0	0	0	0	0	0
23	0	0,001	0	0,006	0,006	0	0	0	0	0	0	0	0
24	0	0,001	0	0,005	0,004	0	0	0	0	0	0	0	0
25	0	0	0	0,003	0,003	0	0	0	0	0	0	0	0
26	0	0	0	0,003	0,002	0	0	0	0	0	0	0	0
27	0	0	0	0,002	0,002	0	0	0	0	0	0	0	0
28	0	0	0	0,001	0,001	0	0	0	0	0	0	0	0
29	0	0	0	0,001	0,000	0	0	0	0	0	0	0	0

Для расчета по снеготаянию в поле

№ ординара	R I	R II	R III	R IV	R V	R VI	R VII	R VIII	R IX	R X	R XI	R XII	R XIII
1	0,447	0,00	0,066	0,002	0,004	0,054	0,146	0,779	0,046	0,011	0,144	0,003	0,002
2	0,358	0,008	0,291	0,034	0,050	0,320	0,428	0,175	0,169	0,084	0,427	0,047	0,054
3	0,137	0,029	0,308	0,102	0,135	0,343	0,281	0,038	0,214	0,164	0,292	0,126	0,122
4	0,041	0,061	0,192	0,157	0,190	0,184	0,108	0,008	0,192	0,192	0,112	0,182	0,155
5	0,012	0,091	0,092	0,177	0,191	0,070	0,029	0,001	0,144	0,173	0,033	0,187	0,159
6	0,003	0,111	0,038	0,161	0,156	0,022	0,007	0	0,099	0,134	0,008	0,157	0,143
7	0,001	0,119	0,014	0,128	0,112	0,006	0,001	0	0,062	0,093	0,002	0,116	0,114
8	0	0,113	0,004	0,092	0,068	0,001	0	0	0,037	0,061	0	0,078	0,082
9	0	0,104	0,001	0,063	0,043	0	0	0	0,022	0,038	0	0,048	0,059
10	0	0,088	0	0,040	0,024	0	0	0	0,013	0,022	0	0,028	0,041
11	0	0,071	0	0,024	0,014	0	0	0	0,006	0,013	0	0,016	0,026
12	0	0,057	0	0,014	0,007	0	0	0	0,003	0,007	0	0,008	0,018
13	0	0,043	0	0,008	0,003	0	0	0	0,001	0,004	0	0,004	0,011
14	0	0,033	0	0,004	0,001	0	0	0	0	0,002	0	0,001	0,008
15	0	0,023	0	0,002	0	0	0	0	0	0,001	0	0,001	0,006
16	0	0,012	0	0,001	0	0	0	0	0	0	0	0	0,004
17	0	0,011	0	0,001	0	0	0	0	0	0	0	0	0,002
18	0	0,008	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,001
19	0	0,004	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,001
20	0	0,003	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	0	0,002	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	0	0,001	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Для расчета по снегоганию в лесу

**ИНСТРУКЦИЯ ПО СОСТАВЛЕНИЮ ПРОГНОЗА ПРИТОКА ВОДЫ  
НА ОСНОВЕ РАСЧЕТА СНЕГОТАЯНИЯ НА ЭВМ  
ДЛЯ ЧАСТИЧНО ЗАЛЕСЕННОГО ВОДОСБОРА  
УГЛИЧСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА**

Для расчета расходов воды в замыкающем створе бассейна на основе учета снеготаяния составлена программа на языке АЛГОЛ-60 для ЭВМ БЭСМ-6. Программа рассчитана на ручную подготовку исходной информации. Алгоритм программы расчета на ЭВМ помещен в настоящем приложении.

### I. Гидрометеорологическая информация

1. Осредненные за сутки по семи станциям данные о температуре воздуха  $t$ .
2. Осредненные за сутки по семи станциям данные об осадках  $x_1$ .
3. Фактические значения притока воды в Угличское водохранилище для расчета ошибки прогноза  $Q_{\phi}$ .

### II. Параметры, постоянные для всех лет

1.  $a$  — коэффициент стаяния для лесной и полевой частей бассейна.
2.  $\beta$  — коэффициент лесистости.
3. Параметр, характеризующий кривую распределения снежного покрова  $\alpha$  для поля и для леса.
4. Гамма-распределение  $\Gamma(\alpha)$  для поля и для леса.
5. Ординаты кривых добегаания для полевой и лесной частей бассейна, принимается одна кривая добегаания  $R$ .
6. Порядковый номер максимальной ординаты кривых добегаания  $M$ .
7. Коэффициент перехода от слоя талого стока  $y$  (мм) к расходам воды  $Q$  ( $\text{м}^3/\text{с}$ )  $K_Q$ .

### III. Параметры, изменяющие свои значения в каждом году

1. Максимальные запасы воды в снежном покрове, сложенные с осадками от даты максимума до начала снеготаяния  $x$  (мм) для полевого и лесного участков.
  2. Плотность снега перед началом снеготаяния  $\rho$ .
  3. Параметр, характеризующий потери талого стока за период половодья  $P_{(m)}$ ; определяется по графику с учетом осеннего увлажнения.
  4.  $N$  — число суток расчета (от начала счета до даты выпуска прогноза).
  5.  $D$  — число суток с начала счета до даты наступления максимального расхода воды для расчета ошибки прогноза.
  6.  $Q_{\text{гр}}$  ( $\text{м}^3/\text{с}$ ) — значение грунтовой составляющей притока.
- Пример записи констант и гидрометеорологической информации помещен в настоящем приложении.

#### Порядок составления массива перфокарт для счета на ЭВМ

1. Программа.
2. Массив исходных данных:
  - 1) константы  $N$ ,  $K_f$ ,  $M$  (общие для поля и леса);
  - 2) осредненная для водосбора температура воздуха;
  - 3) осредненные для водосбора осадки;
  - 4) константы для полевой части бассейна  $M$ ,  $P_{(m)}$ ,  $\beta$ ,  $\alpha$ ,  $\Gamma(\alpha)$ ,  $x_{\text{ср}}$ ,  $\rho$ ;
  - 5) ординаты кривой добегаания  $R$ ;
  - 6) константы для лесной части бассейна  $M$ ,  $P_{(m)}$ ,  $(1-\beta)$ ,  $\alpha_1$ ;
  - 7) ординаты кривой добегаания  $R$ ,  $x_{\text{ср}1}$ ,  $\rho$ ;
  - 8)  $D$  — дата максимального расхода для расчета ошибки прогноза;

- 9)  $Q_{гр}$  — грунтовой приток;  
 10)  $Q_{ф}$  — фактический приток воды в водохранилище.

#### Режим счета и выдача результатов

Расчет производится последовательно в соответствии с уравнениями (1), (2), (9)–(22) в разд. 1.

В процессе счета на печать выдается следующая информация о ходе снеготаяния сначала для полевой, затем для лесной части бассейна:

- 1)  $\gamma_n$  — текущая влагоемкость снега;  
 2)  $h_c$  — неприведенная суточная интенсивность снеготаяния, равная

$$h_c = at_{ср};$$

- 3)  $\Sigma h_c$  — сумма значений  $h_c$  в нарастающем порядке от суток к суткам;  
 4) относительная убыль снега  $z_n$ , т. е.

$$z_n = \Sigma h_c / (x + x_1);$$

- 5) относительная водоотдача снега с учетом его влагоемкости, равная

$$k = \begin{cases} z_n - \gamma_n (1 - z_n), \\ 0 \text{ при } z_n \leq z_0. \end{cases}$$

Значения этого коэффициента практически равны значениям в выдаче п. 4;

- 6) неприведенная интегральная водоотдача снега с учетом динамики его влагоемкости, равная  $H_n = kx$ . Конечные числа этой выдачи равны значениям п. 3;

- 7) неприведенная ежедневная водоотдача снега, равная

$$h_b = H_n - H_{n-1}.$$

Значения  $h_b$  практически равны значениям  $h_c$  из выдачи п. 2;

- 8) суточные ординаты относительно площади бассейна, освобожденной от снега  $\psi$ ;  
 9) относительная площадь бассейна, освобожденная от снега  $F = \Sigma \psi$ , изменяется от весьма малых значений до единицы;  
 10) относительная площадь покрытости снегом  $\Phi = 1 - F$ , значения изменяются от единицы до 0;  
 11) приведенная ежедневная водоотдача снега (подача воды на водосбор)

$$\dot{h} = h_b \Phi;$$

- 12) суммарная водоотдача снега, подача талой воды на водосбор  $\Sigma \dot{h}$ ;  
 13) ежедневная подача талой и дождевой воды на бассейн

$$h_1 = \dot{h} + x_1;$$

- 14) суммарная подача талой и дождевой воды на бассейн  $\Sigma h_1$  равна максимальным запасам воды в снежном покрове, сложенными с осадками до начала снеготаяния и за период половодья, т. е.

$$\Sigma h_1 = \Sigma \dot{h} + \Sigma x_1;$$

- 15) суммарные ежедневные потери

$$\Sigma P_i = P_{(m)} \{1 - \exp [(-\Sigma h_1) / P_{(m)}]\}.$$

Конечное значение выдачи должно быть равно суммарным потерям в поле или в лесу;

- 16) ежедневная водоотдача бассейна (поступление талой и дождевой воды в ручейковую сеть), равная

$$y_c = h_1 - P_i,$$

где

$$P_i = \Sigma P_{i, N} - \Sigma P_{i, N-1};$$

- 17) суммарная водоотдача бассейна  $\Sigma y_c$ , которая численно равна объему стока за половодье в поле или в лесу;

- 18) вычисленные ежедневные расходы воды, значения ежедневного притока в водохранилище  $Q$ . (Выдача конечных результатов помещена в конце настоящего приложения.)

**ПРИМЕР ЗАПИСИ ИСХОДНОЙ ИНФОРМАЦИИ НА  
БЛАНКАХ И ТЕКСТ ПРОГРАММЫ НА ЯЗЫКЕ АЛГОЛ  
ДЛЯ РАСЧЕТА ПРИТОКА ВОДЫ В УГЛИЧСКОЕ  
ВОДОХРАНИЛИЩЕ НА ОСНОВЕ РАСЧЕТА  
СНЕГОТАЯНИЯ**

№ поз.	Числа					Пояснения	№ поз.	Числа					Пояснения
	Пр.	Пор.	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>			Пр.	Пор.	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	
Константы, общие для полевой и лесной частей бассейна							Осадки						
1	0	02	250			N	5	0	01	300			с 22 марта 1979 г.
2	0	03	225			K <sub>f</sub>	2	0	00	000			
3	0	02	260			M	3	0	01	100			
4							4	0	01	200			
5							5	0	00	000			
6							6	0	00	000			
7							7	0	00	000			
8							8	0	00	000			
9							9	0	01	100			
10							10	0	01	200			
11							11	0	01	100			
12							12	0	01	200			
Температура воздуха													
2	0	00	000			с 22 марта 1979 г.	6	0	01	200			
2	0	01	150				2	0	01	100			
3	0	01	200				3	0	00	000			
4	0	01	000				4	0	00	000			
5	0	01	000				5	0	00	000			
6	0	01	100				6	0	00	000			
7	0	01	100				7	0	00	000			
8	0	01	100				8	0	00	000			
9	0	01	100				9	0	00	000			
10	0	01	200				10	0	00	000			
11	0	01	300				11	0	00	000			
12	0	01	200				12	0	00	000			
3	0	01	100			7	0	01	100				
2	0	01	100			2	0	01	100				
3	0	00	000			3							
4	0	00	000			4							
5	0	00	000			5							
6	0	00	000			6							
7	0	00	000			7							
8	0	00	000			8							
9	0	00	000			9							
10	0	01	100			10							
11	0	01	630			11							
12	0	01	650			12							
Переменные параметры для поля													
4	0	01	100			8	0	02	260			M	
2	0	00	000			2	0	02	660			P <sub>(m)</sub>	
3						3	0	00	650			β	
4						4	0	01	772			α	
5						5	0	04	278			Γ (α)	
6						6	0	03	118			x <sub>п</sub>	
7						7	0	00	230			ρ	
8						8							
9						9							
10						10							
11						11							
12						12							

№ поз.	Числа					Пояснения	№ поз.	Числа					Пояснения
	Пр.	Пор.	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>			Пр.	Пор.	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	
Переменные параметры для леса													
9	0	02	260			M	13	1	03	300	000		
2	0	02	660			P <sub>(m)</sub>	2	1	03	200	000		
3	0	00	350			1-β	3						
4	0	01	567			α <sub>1</sub>	4						
5	0	02	689	700		Γ(α <sub>1</sub> )	5						
6	0	03	141			x <sub>л</sub>	6						
7	0	00	230			p	7						
8							8						
9							9						
10							10						
11							11						
12							12						
Расход грунтовых вод						Данные, необходимые для определения ошибки расчета							
10	0	02	270			Q <sub>гр</sub>	14	0	02	100			D
2	0	02	270			KΣ-	2	0	02	100			KΣ
3						конт-	3						
4						роль-	4						
5						ная	5						
6						сумма	6						
7							7						
8							8						
9							9						
10							10						
11							11						
12							12						
Ординаты кривой добегания (принята) одна для полевой и лесной частей)													
11	1	01	413	000		R	15	0	02	310			Q <sub>ф</sub> с 22 марта 1979 г.
2	0	00	107	600			2	0	02	300			
3	0	00	134	700			3	0	02	300			
4	0	00	135	600			4	0	02	300			
5	0	00	123	000			5	0	02	340			
6	0	00	104	400			6	0	02	360			
7	1	01	852	000			7	0	02	330			
8	1	01	675	000			8	0	02	410			
9	1	01	585	000			9	0	02	620			
10	1	01	398	000			10	0	02	710			
11	1	01	298	000			11	0	03	119			
12	1	01	221	000			12	0	03	290			
12	1	01	162	000			16	0	03	425			
2	1	01	118	000			2	0	03	347			
3	1	02	850	000			3	0	03	330			
4	1	02	610	000			4	0	03	336			
5	1	02	440	000			5	0	03	463			
6	1	02	310	000			6	0	03	450			
7	1	02	210	000			7	0	03	469			
8	1	02	150	000			8	0	03	463			
9	1	02	110	000			9	0	03	524			
10	1	03	600	000			10	0	03	536			
11	1	03	500	000			11	0	03	554			
12	1	03	400	000			12	0	03	934			



ВЫДАЧА КОНЕЧНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА  
ПРИТОК ВОДЫ В ВОДОХРАНИЛИЩЕ ( $Q_p$ )

+. 18899999.02  
+. 28701061.02  
+. 63579438.02  
+. 12875685.03  
+. 25318825.03  
+. 36252438.03  
+. 40384662.03  
+. 53863772.03  
+. 61294059.03  
+. 68718554.03  
+. 71075000.03  
+. 78883354.03  
+. 71491072.03  
+. 68492028.03  
+. 57680897.03  
+. 50005874.03  
+. 43459285.03  
+. 37618394.03  
+. 32026879.03  
+. 28874181.03  
+. 22298042.03  
+. 18313110.03  
+. 14886881.03  
+. 12027349.03  
+. 96978471.02  
+. 78293950.02  
+. 63797768.02  
+. 93030515.02  
+. 47180172.02  
+. 41359977.02  
+. 38382190.02  
+. 32189891.02  
+. 28972823.02  
+. 26374962.02  
+. 24368189.02  
+. 22821938.02  
+. 21613765.02  
+. 20805225.02  
+. 20272085.02  
+. 19877490.02  
+. 19585713.02  
+. 19361103.02  
+. 19204065.02  
+. 19187677.02  
+. 19039299.02  
+. 18989902.02  
+. 18959894.02  
+. 18941697.02  
+. 18923138.02  
+. 18918238.02  
+. 18913927.02  
+. 18909974.02

**АЛГОРИТМ ПРОГРАММЫ РАСЧЕТА ПРИТОКА ВОДЫ  
НА ОСНОВЕ РАСЧЕТА СНЕГОТАЯНИЯ  
В УГЛИЩКОЕ ВОДОХРАНИЛИЩЕ НА ЯЗЫКЕ АЛГОЛ**

```

1  'BEGIN' 'INTEGER' M, I, J, N, L, B, D, P, G, MMAX, REK;
2  'REAL' DELTAX, W, WMAX, AST, XAV, R, GMAX, PMAX, Z0, A, GA, KF, K1;
3  'PROCEDURE' EROR(Q, N);
4  'INTEGER' N; 'ARRAY' Q;
5  'BEGIN' 'INTEGER' N1, I; 'REAL' S, S1, S2;

6  'ARRAY' QF[1:N]; P0042(N1, QF); S:=S1:=S2:=0;
7  'FOR' I:=1 'STEP' 1 'UNTIL' N1 'DO' 'BEGIN'
8  S:=S+(QF[I]-Q[I])2; S1:=S1+(QF[I]-Q[I])2 'END';
9  'FOR' I:=N1+1 'STEP' 1 'UNTIL' N 'DO' 'BEGIN'
10 S:=S+(QF[I]-Q[I])2; S2:=S2+(QF[I]-Q[I])2 'END';
11 S:=SQRT(S/(N-1)); S1:=SQRT(S1/(N1-1));
12 S2:=SQRT(S2/(N-N1-1)); P1041(S, S1, S2);
13 'END' EROR;
14 'FOR' REK:=1 'STEP' 1 'UNTIL' 10 'DO' 'BEGIN'
15 P0042(N, KF, MMAX);
16 'BEGIN' 'ARRAY' TCAV, X, F1,
17 F, HD, HN, H, XN, ZN, Z, K, HBIG, HV, HP, SIGMAHP, GN, Z1, H1,
18 XDUBL,
19 SIGMAH1, DELTAZ, DELTAT, DELTAT1, SIGMAPSI, HPRIM, FI,
20 FBIG, Y, SIGMAY, SIGMAKU, KU[1:N], PSI[1:N+4];
21 P0042(TCAV, XDUBL);
22 'FOR' G:=1, 2 'DO' 'BEGIN' P:=W:=0;
23 'FOR' I:=1 'STEP' 1 'UNTIL' N 'DO' X[I]:=XDUBL[I];
24 P0042(M, PMAX, K1, A, GA, XAV, R);
25 'BEGIN' 'ARRAY' RBIG[1:M]; P0042(RBIG);
26 AST:=( 'IF' G=1 'THEN' 4, 4 'ELSE' 2, 4);
27 GMAX:=EXP(-4*R)-0,04; Z0:=
28 ( 'IF' GMAX 'НЕ БОЛЬШЕ' 0, 28 'THEN' 0, 34 * GMAX + 0, 059
29 'ELSE' 0, 25 * GMAX + 0, 083);
30 'IF' G=1 'THEN'
31 'FOR' I:=1 'STEP' 1 'UNTIL' N 'DO' SIGMAKU[I]:=0;
32 'FOR' I:=1 'STEP' 1 'UNTIL' N 'DO' 'BEGIN'
33 H[I]:=TCAV[I]*AST;
34 'IF' TCAV[I]<0 'THEN' 'BEGIN' XAV:=XAV+X[I]; X[I]:=H[I]:=0 'END';
35 M10: XN[I]:=H[I]*( 'IF' I=1 'THEN' 0 'ELSE' XN[I-1]);
36 ZN[I]:=XN[I]/XAV; 'IF' I#1 'THEN' 'BEGIN'
37 'IF' ZN[I]<ZN[I-1] 'THEN' ZN[I]:=ZN[I-1] 'END'; Z[I]:=ZN[I];
38 GN[I]:=(GMAX-0,06)*EXP(-4*ZN[I])+0,06;
39 'IF' GN[I] 'НЕ БОЛЬШЕ' 0,0603 'THEN' GN[I]:=0;

```

```

40 ( K[I]:=('IF'ZNI]<Z0'THEN'0'ELSE'ZN[I]-GN[I]*
41 (1-ZN[I])); HBIG[I]:=K[I]*XAV;
42 HV[I]:=('IF'I=1'THEN'HBIG[I]'ELSE'HBIG[I]-HBIG[I-1]);
43 DELTAZ[I]:=('IF'I=1'THEN'Z[I]'ELSE'ABS(Z[I-1]-Z[I]));
44 'IF'DELTAZ[I]>0.15'THEN'GO TO'M2;
45 'IF'Z[I]=0'THEN'PSI[I]:=0'ELSE'
46 PSI[I]:=DELTAZ[I]*EXP(A*LN(A)-LN(GA)+
47 ((A-1)*LN(Z[I])-A*Z[I])); 'GO TO'M4;
48 M2:'FOR'L:=I+1,STEP'1'UNTIL'I+4'DO'PSI[L]:=0;
49 Z1[I-1]:=Z[I-1]*DELTAZ[I]/4;
50 'FOR'L:=I+1,STEP'1'UNTIL'I+4'DO'BEGIN'
51 PSI[L]:=('IF'Z1[I-1]=0'THEN'0'ELSE'EXP(A*LN(A)-LN(GA)+
52 ((A-1)*LN(Z1[I-1])-A*Z1[I-1])*DELTAZ[I]/4)+
53 ('IF'L=I+1'THEN'0'ELSE'PSI[L-1]));
54 Z1[I-1]:=Z1[I-1]+DELTAZ[I]/4'END';
55 PSI[I]:=PSI[I+4];
56 M4:SIGMAPSI[I]:=PSI[I]+('IF'I=1'THEN'0'ELSE'
57 SIGMAPSI[I-1]); F1[I]:=1-SIGMAPSI[I];
58 'IF'F1[I]<0'THEN'F1[I]:=0;
59 F1[I]:=('IF'I=1'THEN'F1[I]'ELSE'(F1[I]+F1[I-1])/2);
60 HP[I]:=HV[I]*F1[I];
61 'IF'F1[I-1]'НЕ БОЛЬШЕ'0.2'THEN'BEGIN'
62 'IF'P=1'THEN'GO TO'M6;
63 DELTAX:=(XAV-SIGMAHP[I-1])/F1[I-1]; P:=1;
64 M6:'IF'F1[I-1]'НЕ БОЛЬШЕ'0.01'THEN'F1[I]:=0;
65 HP[I]:=DELTAX*(F1[I-1]-F1[I])'END';
66 'IF'I=1'THEN'SIGMAHP[I]:=HP[I]'ELSE'
67 SIGMAHP[I]:=SIGMAHP[I-1]+HP[I];
68 H1[I]:=HP[I]+X[I];
69 SIGMAH1[I]:=H1[I]+('IF'I=1'THEN'0'ELSE'SIGMAH1[I-1]);
70 HPRIM[I]:=SIGMAH1[I];
71 FBIG[I]:=PMAX*(1-EXP(-HPRIM[I]/PMAX));
72 V[I]:=H1[I]-('IF'I=1'THEN'FBIG[I]'ELSE'
73 FBIG[I]-FBIG[I-1]);
74 SIGMAY[I]:=V[I]+('IF'I=1'THEN'0'ELSE'SIGMAY[I-1]);
75 'FOR'L:=1,STEP'1'UNTIL'M'DO'BEGIN'
76 J:=I+L-1; 'IF'J'НЕ БОЛЬШЕ'N'THEN'BEGIN'
77 KU[J]:=V[I]*RBIG[L]*KF*K1;
78 SIGMAKU[J]:=SIGMAKU[J]+KU[J]'END'END'END';
79 'IF'G=2'THEN'BEGIN'REAL'QGR;
80 P0042(QGR);
81 'FOR'L:=1,STEP'1'UNTIL'N'DO'
82 SIGMAKU[I]:=SIGMAKU[I]+QGR'END'GEQ2;
83 P1041(GN,H,XN,ZN,K,HBIG,HV,PSI,SIGMAPSI,
84 F,HP,SIGMAHP,H1,SIGMAH1,FBIG,V,SIGMAY,SIGMAKU)
85 'END'END';
86 EROR(SIGMAKU,N);
87 'END'END'END';

```

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акинъшин В. В. и др. Способы определения параметров кривых добега-ния. — Труды Гидрометцентра СССР, 1971, вып. 72, с. 34—53.
2. Бельчиков В. А., Корень В. И., Кучмент Л. С. Методические указа-ния по построению математической модели формирования дождевых павод-ков и ее использованию для выпуска оперативных прогнозов расходов воды с помощью ЭВМ. — М.: Отпеч. на множит. аппарате Гидрометцентра СССР, 1974. — 150 с.
3. Жидиков А. П. и др. Методы расчета и прогноза половодья для каскада водохранилищ и речных систем. — Л.: Гидрометеиздат 1977. — 128 с.
4. Жидиков А. П. Краткосрочный прогноз ежедневного притока в Рыбинское водохранилище в период половодья. — Труды Гидрометцентра СССР, 1977, вып. 191, с. 62—90.
5. Жидиков А. П. Расчеты гидрографа весеннего притока воды в водохра-нилища Верхней Волги. — Труды Гидрометцентра СССР, 1980, вып. 223, с. 64—84.
6. Жидиков А. П., Нечаева Н. С. Опыт выпуска краткосрочных прог-нозов весеннего притока воды к Волжским водохранилищам. — Труды Гидро-метцентра СССР, 1981, вып. 240, с.
7. Калинин Г. П., Милюков П. И. Приближенный расчет неустановив-шегося движения водных масс. — Л.: Гидрометеиздат, 1958. — 70 с.
8. Комаров В. Д. Весенний сток равнинных рек Европейской части СССР, условия его формирования и методы прогноза. — М.: Гидрометеиздат, 1959. — 295 с.
9. Комаров В. Д., Макарова Т. Т., Синегуб Е. С. Расчет гидрографа половодья небольших равнинных рек на основе данных об интенсивности снеготаяния. — Труды Гидрометцентра СССР, 1969, вып. 37, с. 3—30.
10. Методические указания по проведению оперативных испытаний но-вых методов гидрометеорологических прогнозов. — Л.: Гидрометеиздат, 1977. — 100 с.
11. Наставление по службе прогнозов. Разд. 3, ч. I. — Л.: Гидрометеиздат, 1962. — 120 с.
12. Попов Е. Г. Вопросы теории и практики прогнозов речного стока. — М.: Гидрометеиздат, 1963. — 295 с.
13. Чемеренко Е. П. Автоматическая обработка оперативной гидрологической информации и подготовка исходных данных к прогнозу. — Труды Гидромет-центра СССР, 1977, вып. 183, с. 66—74.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение . . . . .	3
1. Методы прогноза (расчета) расходов воды малых рек на основе снеготаяния . . . . .	4
1.1. Описание моделей формирования талого стока . . . . .	—
1.2. Рекомендации по определению параметров и констант моделей . . . . .	11
1.3. Влияние изменчивости параметров модели на расчеты (прогнозы) гидрографа половодья . . . . .	16
1.4. Коррекция прогнозируемых (рассчитанных) расходов в замыкающем створе реки . . . . .	24
1.5. Оценка методики прогнозов расходов воды . . . . .	26
2. Примеры разработки практических схем прогнозов (расчетов) расходов воды небольших рек по снеготаянию . . . . .	27
2.1. Общие замечания . . . . .	—
2.2. Прогноз (расчет) расходов воды р. Оки до г. Орла . . . . .	28
2.3. Прогноз (расчет) расходов воды р. Мологи у Устюжны . . . . .	32
3. Примеры разработки практических схем прогнозов (расчетов) ежедневного притока воды в водохранилища в период половодья . . . . .	38
3.1. Принципы построения схемы прогноза . . . . .	—
3.2. Прогноз (расчет) притока воды в Угличское водохранилище по снеготаянию . . . . .	—
3.3. Прогноз притока воды в Горьковское водохранилище по снеготаянию и расходам воды малых рек . . . . .	46
4. Схема автоматизированного выпуска прогноза притока воды в каскад водохранилищ (на примере р. Волги) . . . . .	53
4.1. Общие замечания . . . . .	—
4.2. Исходные данные для разработки схемы и выпуска прогнозов . . . . .	54
4.3. Обработка информации на ЭВМ . . . . .	—
4.4. Общая схема прогноза . . . . .	55
5. Выводы . . . . .	57
Приложение 1 . . . . .	58
Приложение 2 . . . . .	62
Пример записи исходной информации на бланках и текст программы на языке АЛГОЛ для расчета притока воды в Угличское водохранилище на основе расчета снеготаяния. Выдача конечных результатов расчета . . . . .	64
Выдача конечных результатов расчета. Приток воды в водохранилище ( $Q_p$ ) . . . . .	68
Алгоритм программы расчета притока воды на основе расчета снеготаяния в Угличское водохранилище на языке АЛГОЛ . . . . .	69
Список литературы . . . . .	71

Алексей Павлович Жидиков  
Наталья Сергеевна Нечаева

**Методические указания по разработке схем краткосрочных прогнозов расходов воды рек и притока воды в водохранилища в период половодья на основе моделей талого стока (на примере бассейна р. Волги)**

Редактор Е. Э. Булаховская. Технический редактор М. И. Брайнина. Корректор С. П. Доничкина. Н/К. Сдано в набор 24.03.82. Подписано в печать 23.09.82. М-26618. Формат 60×90<sup>1/16</sup>. Бум. тип. № 1. Литературная гарнитура. Печать высокая. Печ. л. 4,5. Кр.-отт. 4,63. Уч.-изд. л. 6,33. Тираж 430 экз. Индекс ГЛ-197. Заказ № 294. Цена 35 коп. Заказное. Гидрометеоздат. 199053. Ленинград, 2-я линия, д. 23.

Типография им. Котлякова издательства «Финансы и статистика» Государственного комитета СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 191023. Ленинград, Д-23, Садовая, 21.