

МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ФИЗИКО-СТАТИСТИЧЕСКИХ ВИДОВ КРАТКОСРОЧНЫХ ПРОГНОЗОВ СТОКА ГОРНЫХ РЕК

В.М. Мухин

*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации
volod@metcom.ru*

1. Отличительные особенности стока горных рек и его формирования

Как известно, реки являются продуктом взаимодействия процессов накопления и расходования влаги. Основную особенность этого взаимодействия в горах определяет вертикальная зональность физико-географических условий, и прежде всего климата.

Накопление влаги в горах происходит в зависимости от географического положения гор, главным образом, за счет осадков в холодный период – разновидностей замерзшей воды: снега, глетчера, льда, причем накопление осадков в твердом виде возрастает с высотой зоны. Таяние и освобождение гор от снега растягивается во времени также в зависимости от высоты бассейна, высоты основных стокоформирующих зон и, главным образом, от климатических условий. С увеличением диапазона высот в горах увеличивается как продолжительность холодного периода и, соответственно, величина снеготаяния, так и продолжительность снеготаяния.

В Сибири многие крупные реки берут начало в горах и текут с юга на север. На низкогорьях и на равнине в бассейнах таких рек, как правило, наблюдается мощный снежный покров. На Урале, особенно на его западных склонах, в низовьях горных рек также залегают довольно мощный снежный покров.

Заток тепла в зону залегания снега вызывает его таяние. После превышения его водоудерживающей способности начинается водоотдача, захватывающая все более обширные зоны. Одновременное выпадение жидких осадков на тающий снег приводит к резкому повышению водоотдачи: кроме того, что осадки приносят дополнительно тепло, капли дождя действуют разрушающе на снежные микрообразования.

Вода, достигшая почвы, в зависимости от подстилающей породы либо быстро стекает в русловую сеть при скалистом грунте, либо, что более распространено в горах, просачивается в нижние слои по крупно- и мелкообломочным материалам. В связи с этим вода в разных участках бассейна, как правило, проходит через замыкающий створ на реке в разное время: от нескольких часов до трех месяцев.

Эта особенность стекания воды в горах позволяет составлять как краткосрочные, так и долгосрочные прогнозы стока.

К особенностям горных рек, приводящим к необходимости выделять прогнозы стока для них в отдельную группу, по сравнению с прогнозами для равнинных рек, относится недостаток исходных наблюдений, связанный прежде всего с труднодоступностью территорий и опасностью проведения наблюдений. Если для равнинных рек наблюдаемые запасы воды в бассейне считаются реальной величиной и входят, как правило, в балансовые методы расчета или прогноза стока, то наблюдения в горных регионах над небольшие территории – склоны реки, большие впадины, а иногда только то место, на котором установлен измерительный прибор, например, перевал, где часто наблюдаются сильные ветры, которые приводят к выдуванию снега из прибора, что занижает действительное количество осадков, поступившее на водосбор.

Таким образом, для горных бассейнов приходится разрабатывать методы интерполяции и экстраполяции данных наблюдений как по высоте, так и пространству. Методы могут быть простыми и достаточно сложными, учитывающими экспозицию склонов, время года, склонение солнца к горизонту и другие факторы. В последние годы созданы методы расчета запасов воды в снежном покрове по данным об осадках и температуре воздуха.

Величина стока и его распределение во времени зависит от факторов, которые подразделяются на постоянные и переменные.

К постоянным факторам (в порядке весомости их влияния) относятся:

- географическое положение бассейна в той или иной климатической зоне;
- размеры бассейна;
- диапазон высот;
- гипсографическая кривая площадей (распределение площадей высотных зон);
- расположение основных хребтов к влагонесущим атмосферным потокам;
- растительность;
- проницаемость почвогрунтов бассейна.

Климатическая зона, в которой расположен бассейн, прежде всего определяет общее среднегодовое количество осадков и их распределение по высоте.

Величина бассейна сказывается на величине стока. Кроме того, чем больше бассейн, тем разнообразнее условия формирования стока в его частях, а это, в свою очередь, влияет на распределении стока, как по площади, так и во времени.

От диапазона высот зависит, главным образом, величина осадков, выпадающих и накапливающихся в твердом виде, а также распределение стока во времени – чем выше

бассейн, тем позже наблюдаются положительные температуры воздуха и тем позже проходит талая снеговая и ледниковая вода через замыкающий створ реки.

Распределение площадей по высотным зонам бассейна – также постоянный фактор. Это распределение, выраженное графически, называется гипсографической кривой и является одной из важнейших характеристик бассейна. Она привлекается для расчета распределения количества накопленных в твердом виде осадков в каждом году. Точность зависит от того, какое принимается превышение верхней границы зоны над нижней (обычно 200–500 м) и от масштаба картографического материала, применяемого для расчета гипсографической кривой. Все это сказывается на результатах расчета стока.

Само распределение площадей, так же как и диапазон высот, оказывает влияние на распределение стока во времени и величину потерь стока (коэффициенте стока), который, как правило, увеличивается с высотой.

Известно, что основные влагонесущие потоки в Европейской России направлены с запада на восток. Это сказывается, например, на том, что на западном склоне Урала выпадает на 300 мм осадков за год больше, чем на восточном склоне. В Сибири в верховьях р. Оби количество осадков на склонах, имеющих западную экспозицию, также превышает количество осадков на склонах восточной экспозиции.

Вертикальная зональность климата в горах сказывается на растительности. Чем более влажный и теплый климат преобладает на том или ином склоне, тем более плотная растительность произрастает на нем. Так, на южных склонах Кавказа преобладают широколиственные леса. Выше – луга с альпийским разнотравьем, еще выше – низкорослая растительность, сменяющаяся тундровой, гольцами, снежниками и ледниками. В Сибири в нижних и средних зонах преобладают хвойные породы, поднимающиеся до 1500-2000 м. Залесенность бассейна хотя и относится к постоянным факторам стока, проявляется по-разному, в зависимости от соотношения снегозапасов на открытой и залесенной местности в конкретном году. Влияние лесов в общем виде проявляется в увеличении потерь в лесном массиве, перехвате осадков, особенно в твердом виде, в увеличении продолжительности снеготаяния.

Кроме лесов большое влияние на величину потерь стока и его распределение во времени оказывает состояние подстилающей поверхности – трещиноватые каменистые горные породы, покрытые тонким слоем почвы, обладающим относительно большим коэффициентом фильтрации. Уходящие вглубь трещины позволяют накапливаться большим количеством медленно движущейся воды в подземных крупных резервуарах. Поэтому нередко в математических моделях процесс стекания воды в горах представляют в виде прохождения воды через две емкости. Первая из них представляет быстрое стекание воды по

поверхности бассейна – оно длится от нескольких часов до 2–3 суток. Вторая представляет стекание воды через подземные полости и трещины, время стекания через которые измеряется иногда месяцами. Для примера на рис. 1 представлены две составляющие стока р. Варзоб.

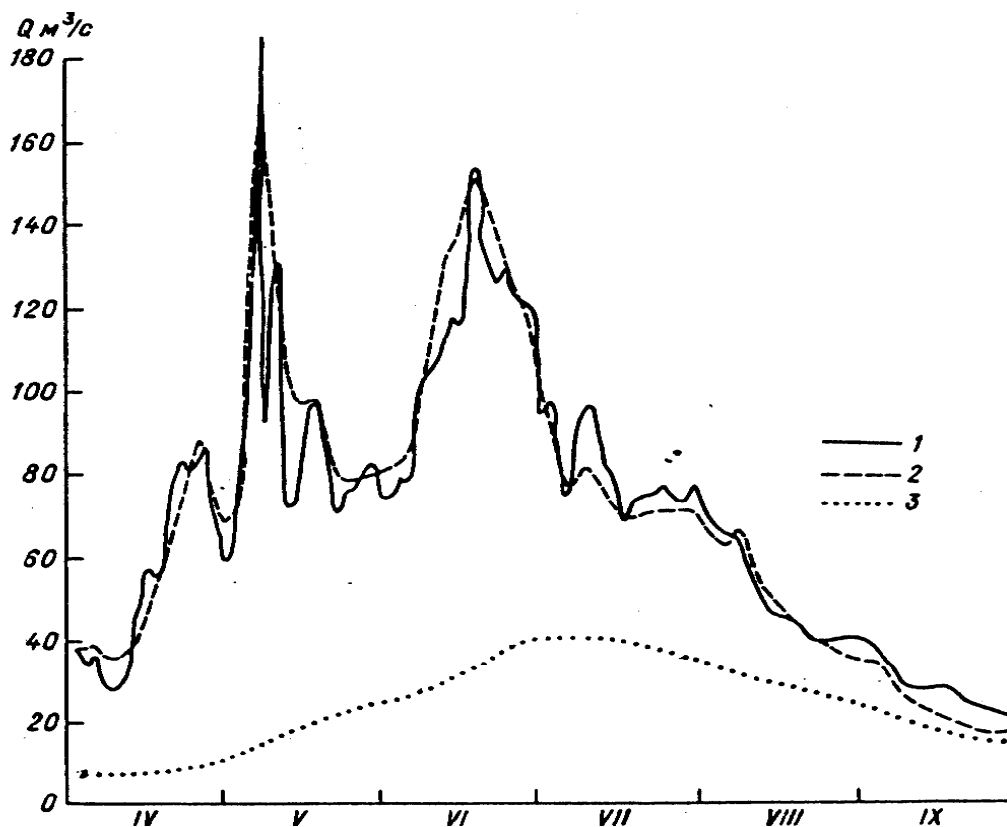


Рис. 1. Две составляющие стока р. Варзоб
(1 - общий гидрограф, 2 – расчетный гидрограф, 3 -подземная составляющая).

Каждый из перечисленных факторов по-своему оказывает влияние на величину стока и его распределение во времени, но в одном и том же бассейне, как правило, одинаково в различные годы. Однако, например, при ливневых осадках, интенсивность которых превосходит интенсивность впитывания, проницаемость почвогрунтов может быть переменной величиной.

Переменные факторы зависят, прежде всего, от погодных условий.

К переменным факторам стока горных рек относятся :запасы воды в снежном покрове, осадки за период снеготаяния и после него, температура воздуха. Кроме этих основных факторов большое влияние как на величину стока, так и его распределение во времени оказывают дружность снеготаяния, скорость проникновения положительных температур воздуха на высоту зон с большими запасами снежного покрова, ветровой режим, который

служит причиной переноса снега с верхних зон в долины. Сход снежных лавин также влияет на перераспределение снега на высоте.

Выпадение жидких осадков на тающий снег, во-первых, как говорилось выше, приносит дополнительное тепло, а, во-вторых, способствует разрушению частиц снега и более быстрому заполнению мелких пор, т.е. уменьшает время до начала отдачи воды из снега.

Определенное воздействие на скорость таяния снега и ледников оказывает величина их отражательной способности (альбедо), которая зависит от запыленности, влагонасыщенности и плотности снега.

К переменным факторам снеготаяния, а значит и стока, можно отнести время начала снеготаяния, так как, с одной стороны, чем позже начинается снеготаяние, тем вероятнее, что оно будет проходить при более высоких температурах, а, с другой стороны, возрастает интенсивность таяния из-за более высокого склонения солнца.

2. Основы различных видов прогнозов

Теоретической основой для разработки прогнозов рек является уравнение водного баланса речного бассейна. Такое уравнение для горных рек отличается тем, что составляется для каждой конкретной высотной зоны, которые затем суммируются. В общем виде оно может быть представлено следующим образом:

$$Y_0 = \sum_{i=1}^{i=n} S_{t,i} f_i + \sum_{i=1}^{i=n} X_{1,i} f_i + \sum_{i=1}^{i=n} X_{2,i} f_i + \sum_{i=1}^{i=n} H_T f_{л,i} - \sum_{i=1}^{i=n} E_{с,i} f_i - \sum_{i=1}^{i=n} E_{n,i} f_i - \sum_{i=1}^{i=n} E_{л,i} f_i + \pm \Delta_{зп} \pm \Delta_{\delta} \pm \Delta_n, \quad (1)$$

где Y_0 – сток реки за расчетный период, включая базисный сток, который поступает в русло бассейна из влагозапасов предыдущего периода (гидрологического цикла); $S_{t,i}$ – запас воды в снежном покрове в i -той высотной зоне перед началом снеготаяния в момент t ; X_1 – количество осадков на снег за время снеготаяния; X_2 – количество осадков на почву, свободную от снега, до окончания расчетного периода; $H_T f_{л}$ – количество стаявшей воды с ледников и вечных снегов на площади, освободившейся от сезонного снежного покрова; $E_{с}$, E_n – испарение с поверхности снега, почвы соответственно; $E_{л}$ испарение влаги, задержанной кронами леса; f_i – площадь i -той высотной зоны; $\pm \Delta_{зп}$ – изменение запасов

грунтовых вод, расположенных выше слоев, обуславливающих изменение базисного стока; $\pm \Delta_{\sigma}$ и $\pm \Delta_n$ – изменение базисного стока и запасов влаги в почве соответственно.

Целиком реализовать приведенное уравнение для составления прогнозов в оперативном режиме, как правило, не удастся, так как либо одни составляющие измерить невозможно, а другие не известны к моменту составления прогноза. В связи с этим применяются упрощенные формы этого уравнения, в которых часть составляющих исключается либо заменяется косвенными характеристиками. Тогда сами прогнозы называются физико-статистическими и для их разработки применяются специальные методы, также называемые физико-статистическими.

Одной из составляющих стока в горах является талая вода. Количество талой воды h_T наиболее просто выражается зависимостью от суммы положительных температур воздуха (при наличии достаточного запаса воды в снежном покрове) через коэффициент таяния k следующим образом

$$h_T = k \sum_{i=1}^{i=t} \Theta_i^+ \quad (2)$$

где t – момент составления прогноза; i – номер суток от момента перехода температуры воздуха через 0°C ; Θ_i^+ – положительные температуры воздуха.

Оставшаяся в бассейне часть запасов воды в снежном покрове S_{oc} на момент составления прогноза, которая оказывает наиболее существенное влияние на величину будущего стока вычисляется:

$$S_{oc} = S_{max} - k \sum_{i=1}^{i=t} \Theta_i^+ \quad (3)$$

где S_{max} – максимальные наблюдаемые или вычисленные запасы воды в снежном покрове. Вычисление запасов воды в снежном покрове нередко производится с помощью подсчета суммы осадков, выпавших в бассейне в твердом виде. Тогда S_{max} заменяют суммой осадков

$$S_{max} = \sum_{i=1}^{i=t} X_i \quad (4)$$

где $i=1 \div t$ – холодный период, т.е. период, когда температура воздуха имеет отрицательные значения.

Сток воды за период заблаговременности прогноза зависит, кроме других факторов, также от водности предшествующего ему периода.

Представляя истощение накопленной в бассейне воды с помощью экспоненты и суммируя его с базисным стоком, получим минимальную величину стока на период прогноза.

Базисным стоком принято называть медленно меняющийся сток, переходящий из предыдущего гидрологического периода и часто принимаемый за постоянный. Правильнее его представлять с помощью экспоненциального закона, например:

$$Q_{\bar{o},t+\Delta} = Q_{\bar{o},t} \exp(-\beta\Delta), \quad (5)$$

где $Q_{\bar{o},t}$ – базисный сток в момент составления прогноза t ; β – параметр, характеризующий скорость истощения; Δ – период заблаговременности прогноза.

Расход воды в замыкающем створе реки в момент составления прогноза можно представить суммой двух составляющих

$$Q_t = Q_t^* + Q_{\bar{o},t}, \quad (6)$$

где Q_t^* – расход воды над базисным стоком. Тогда уравнение, представляющее истощение влагозапасов в бассейне над базисным стоком, будет выглядеть следующим образом

$$Q_{t+\Delta} = Q_{t+\Delta}^* + Q_{\bar{o},t+\Delta} = Q_t^* \exp(-\alpha\Delta) + Q_{\bar{o},t} \exp(-\beta\Delta). \quad (7)$$

При постоянном периоде заблаговременности прогноза величина $\exp(-\alpha\Delta)$ становится константой и тогда уравнение (7) превращается в уравнение следующего вида

$$Q_{t+\Delta} = aQ_t^* + bQ_{\bar{o},t}. \quad (8)$$

Поступление воды в русла и последующее ее стекание к замыкающему створу можно выразить зависимостью будущего поступления воды от оставшегося в бассейне снега путем расчета следующей разницы

$$Q_t = f\left(S_{max} - k \sum_{i=1}^{i=t} \Theta_i^+\right). \quad (9)$$

Тогда, складывая выражения (9) и (8), получим общую формулу для прогноза стока:

$$Q_{t+\Delta} = a_1 \left(S_{max} - k \sum_{i=1}^{i=t} \Theta_i^+ \right) + a_2 Q_t^* + a_3 Q_{\bar{o},t}. \quad (10)$$

Упрощая последнее и подставляя Q_t вместо Q_t^* , получим

$$Q_{t+\Delta} = a_1 S_{max} + a_4 \sum_{i=1}^{i=t} \Theta_i^+ + a_2 Q_t + a_5 Q_{\bar{o}}, \quad (11)$$

где $a_5 = a_3 - a_2$. Параметры $a_i = a_1 \div a_5$ обычно находят с помощью метода наименьших квадратов, но можно определить их отдельно, поэтапно.

Заменяя часть переменных в уравнении (11), его можно представить в другом виде, удобном для применения:

$$Q_{t+\Delta} = b_1 \sum_{i=1}^{i=t} X_i - b_2 \bar{\Theta}^+ + b_3 \bar{Q}_t + C, \quad (12)$$

где $\bar{\Theta}^+$ и \bar{Q}_t – соответствующие температура воздуха и расход воды, средние за какой-либо предшествующий период; C – свободный член; $b_1 \div b_3$ – параметры.

Последнее уравнение может служить основой для разработки прогнозов стока горных рек с различной заблаговременностью.

3. Краткосрочные прогнозы стока горных рек

Разработка методов прогнозов стока горных рек начинается с оценки и расчета постоянных факторов стока, прежде всего, с построения гипсографической кривой, которая может оказаться необходимой для расчета запасов воды в снежном покрове на различных высотах бассейна.

При большой разнице в снегонакоплении или выпадении осадков на различных хребтах долины реки гипсографические кривые строятся для каждого борта долины отдельно.

Сопоставление гипсографических кривых бассейнов притоков и самой реки Кубани с данными об абсолютной высоте метеорологических станций и постов подтверждает существующую для среднестатистического горного речного бассейна закономерность: верхняя часть бассейна, где формируется значительная доля стока, не освещается метеорологическими наблюдениями. Так, в бассейне р. Псекупс наибольшую абсолютную отметку имеет метеостанция п. Садовая (200 мБС), а 50,3 % площади бассейна находится выше. Аналогичная картина наблюдается в бассейнах трех других рек: в бассейне р. Пшиш выше метеостанции п. Горная (272 мБС) расположено около 42 % площади; р. Пшеха выше п. Черниговская (301 мБС) – 67,6%; р. Белой выше п. Гузерипль (671 мБС) – около 44 %. Подчеркнем, что данный расчет (при линейной интерполяции) произведен до устьевых замыкающих створов. При рассмотрении частных бассейнов неосвещенная метеорологическими наблюдениями доля бассейнов очевидно увеличится.

Гидрологические данные наблюдений были подвергнуты первичному анализу путем построения графиков кривых расходов воды $Q = f(H)$. Наиболее сложный вид имеют кривые расходов в створе Горячий Ключ на р. Псекупс в 1992, 1995 и 2002 гг. Трудно

выявить все причины значительного разброса точек на графике, однако можно предположить, что одной из главных является нарушение однородности в измеренных величинах расходов воды, которые, как обнаружилось, измеряются приближенными способами. Полное выявление причин столь существенных изменений кривых расходов требует дополнительного исследования (не имеются в виду явные опечатки).

Причиной, повлекшей за собой такого рода изменения кривых расходов воды $Q = f(H)$ в створе п. Горячий Ключ, является изменение гидравлики речного потока на участке водомерного поста. Данный факт можно связать со строительством ниже поста дамбы, которая вызвала определенное изменение направления течения реки и русловые деформации.

Неустойчивость гидравлических показателей также имеет место в русле р. Пшиш, что проявляется в изменении год от года вида кривых расходов воды $Q = f(H)$ в створе п. Хадыженск.

Вся исходная информация требует тщательной проверки и анализа, т. к. ошибки могут достигать от 2 до 10-кратной величины, причем без всякой закономерности в их появлении. Редко они носят характер опечаток.

К сожалению, в данных наблюдений также содержатся ошибки. Обнаружение и исправление грубых ошибок является весьма трудоемкой работой и к тому же не гарантирует общепринятой точности исходной информации, что в той или иной мере неизбежно сказывается на качестве разрабатываемых прогнозных методик.

Малый диапазон высот метеостанций и их расположение в низинных частях бассейнов приводят к значительному разбросу точек на графиках. Для уточнения зависимостей необходимо привлекать данные о средних многолетних месячных значениях температуры воздуха, а при расчете осадков – данные суммарных осадкомеров.

Постоянной величиной для конкретного бассейна принято считать вертикальный градиент температуры воздуха γ . Однако исследования последнего десятилетия, выполненные в рамках математического моделирования гидрологических процессов в горах, показали, что величина γ весьма существенно меняется по сезонам.

Градиент $\gamma(t)$ обычно находят как тангенс угла наклона линии связи $\Theta = f(z)$ по зависимостям средних многолетних месячных значений приземной температуры воздуха от высоты.

В нашей стране принят следующий вид зависимости $\Theta = f(z)$ [1, 3, 4]:

$$\Theta(z, t) = \Theta(z_0, t) - \gamma(t)(z - z_0), \quad (13)$$

где t – переменная времени; $\Theta(z_0, t)$ – средняя по станциям температура воздуха на высоте приведения z_0 , вычисленная по выражению:

$$\bar{\Theta}(z_0, t) = \frac{1}{n} \cdot \sum_{j=1}^n [\Theta(z_j, t) - \gamma(t)(z_0 - z_j)], \quad (14)$$

где z_j – высота j -ой станции, км; n – число станций.

Вертикальный градиент температуры воздуха имеет закономерный внутригодовой ход. В виде соответствующего графика он представлен на рис. 2 (значения вертикального градиента температуры даны в градусах на километр подъема в абсолютном выражении).

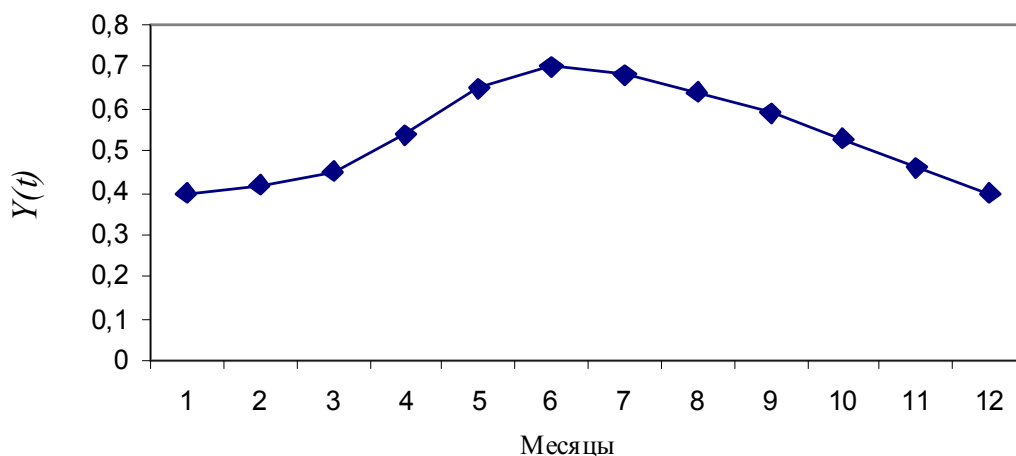


Рис. 2. Аппроксимация внутригодового градиента температуры воздуха, °С/км на склоне Алайского хребта в бассейне р.Карадарьи.

Величина вертикального градиента, принятого за постоянную для всего года, вычисляется путем расчета разницы между среднегодовой температурой воздуха на станциях, наиболее удаленных по высоте:

$$\gamma = \frac{100(\Theta_1 - \Theta_2)}{\Delta H}, \quad (15)$$

где Θ_1 – температура воздуха на нижней станции; Θ_2 – соответствующая ей температура на верхней станции; ΔH – разница в высоте станций над уровнем моря, м.

Для учета изменения величины температурного градиента его значения вычисляются для каждого месяца, далее наносятся на график изменения по месяцам и аппроксимируются подходящей кривой.

Для гор Средней Азии, например, получена формула следующего вида:

$$\gamma(t) = \gamma_0 + \frac{a^3}{a^2 + \frac{(t - \tau_0)^2}{c}}, \quad (16)$$

где a , γ_0 и τ_0 – параметры; c – масштабный множитель. Эти параметры определяются непосредственно по характеристикам эмпирической кривой, отражающей изменение $\gamma(t)$.

Нередко применяют одно значение $\gamma(t)$ для всего года, равное средней величине – приблизительно $0,5$ °С на 100 м высоты (5 °С на 1 км высоты).

На основе уравнений (11) и (12) можно получить несколько разновидностей краткосрочных прогнозов. Наибольшую точность имеют прогнозы по уравнению (11) в период прохождения пика и на спаде половодья. Обусловлено это тем, что в период подъема половодья снега в горах еще много, а температуры не достигают высоких значений. Поэтому величина расхода воды в период заблаговременности в апреле–мае зависит главным образом от погодных условий. В последующий период, когда положительные температуры воздуха достигают высоты $2,0$ – $2,5$ км, объем стока зависит от оставшихся запасов воды в снежном покрове, так как при высоких температурах он может либо весь стаять, либо большая его часть.

Примером применения уравнения вида (12) для прогноза расхода воды в июне р. Нарын может служить следующее:

$$Q_{t+5} = 0,71 \sum_{i=1}^{i=t} \bar{X}_i - 15,3 \bar{\Theta}_t + \bar{Q}_t + 65, \quad (17)$$

где черта над символом означает осреднение за период, указанный внизу справа от символа. Оптимальная продолжительность периода осреднения подбирается опытным путем.

Влияние количества оставшихся на поверхности бассейна снеготазов на будущий сток снижается с середины до конца спада половодья. В это время увеличивается роль истощения запасов влаги, накопленных в бассейне, в связи с чем точность уравнения (17) повышается, если применить следующее уравнение, включающее отношение средних расходов воды к температуре воздуха за предшествующий период:

$$Q_{t+5} = 1,15 \cdot \frac{\bar{Q}_{t-5}}{\bar{\Theta}_{t-5}} + 245, \quad (18)$$

(погрешность $\Delta/\sigma = 0,56$).

Уравнения (17) и (18) ранее разрабатывались опытным путем, но не имели четкого физического объяснения, основанного на анализе уравнения водного баланса горного бассейна.

На основании уравнения (17) можно сделать следующие выводы. Отрицательный знак перед средней температурой воздуха означает, что чем больше ее величина, тем больше снега стаяло к моменту составления прогноза, тем меньше будет величина расхода в следующем периоде. Величины \bar{Q}_{t+5} и параметра перед ним характеризуют запасы влаги в бассейне и скорость их истощения. Отношение Q/Θ имеет тот же смысл, но служит лучшей косвенной характеристикой при имеющейся нелинейности связи между аргументами и функцией.

Для горных, а особенно высокогорных бассейнов, измерения снежного покрова по всему бассейну произвести не удастся. Этим в числе прочего прогнозы для горных рек отличаются от прогнозов для равнинных рек.

При использовании имеющихся измерений предварительно производится отбор наиболее репрезентативных из них и исключаются явно аномальные данные. К таким относятся, например, данные снегопунктов, расположенных на перевалах, так как их данные как правило искажены воздействием ветра. Воздействие лавин также исключается из числа точек, принятых для определения среднего запаса воды в снежном покрове. Мало информативны снегопункты, расположенные в предгорьях.

Для прогноза стока по снегозапасам применяются простейшие корреляционные соотношения следующего вида

$$\bar{Q}_{t+5} = f(S_t, C), \quad (19)$$

где \bar{Q}_{t+5} – средний расход воды за период заблаговременности (1–5 суток); S_t – запас воды в снежном покрове на момент составления прогноз; C – свободный член.

Прогнозы по таким уравнениям наиболее удаются для горных регионов, в которых мало выпадает осадков в весенний и летний периоды, а сток формируется главным образом за счет зимних осадков в твердом виде.

4. Учет осадков в прогнозах стока

Наиболее распространенной характеристикой общего количества влаги, накопившейся в бассейне к моменту составления прогноза стока на период вегетации, является сумма осадков за холодный период. Во многих случаях эта характеристика бывает даже более показательна, чем измеренные снегозапасы. Снежный покров в горах подвержен, как уже было сказано, многим факторам, приводящим к его перераспределению, а в верхних зонах он вообще бывает недоступен для измерений.

Пример зависимости притока воды в Токтогульское водохранилище \bar{Q}_{t+5} от суммы осадков приведен на рис. 3.

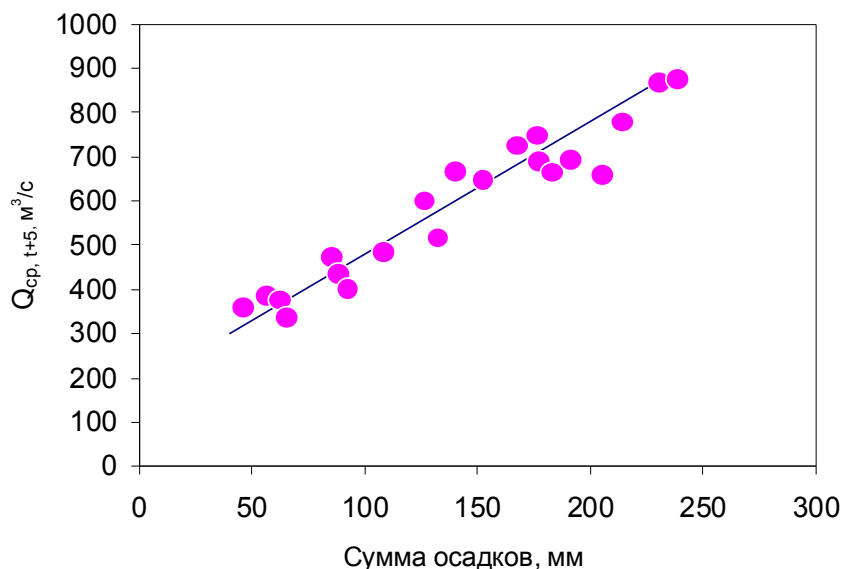


Рис. 3 . Зависимость притока воды в Токтогульское водохранилище от суммы осадков за предшествующий период.

Аргументом в этой зависимости служит среднеарифметическое значение осадков по шести станциям в бассейне р. Нарын.

Для рек Кавказа, в бассейнах которых твердые осадки превышают 40–50 % общей суммы осадков, можно получать подобные прогностические зависимости. Продолжительность же суммирования осадков подбирается опытным путем, т.к. на будущий сток оказывает влияние и осеннее увлажнение бассейна.

Особенностью физико-статистических методов прогнозов является необходимость иметь достаточно длинный ряд наблюдений, включающий разнообразные факторы формирования стока. Необходимо также иметь 5–6 лет независимой выборки данных для проверки полученной прогностической зависимости.

В случаях использования в качестве аргументов запасов воды в снежном покрове от момента их наблюдения до момента составления прогноза могут наблюдаться как оттепели, так и выпадение жидких осадков на снег. Во втором случае жидкие осадки прибавляются к снегозапасам:

$$S_{t+5} = S_t + X, \quad (20)$$

где t – момент составления прогноза; X – жидкие осадки от момента наблюдения S_t до момента, близкого к t .

При оттепелях, наблюдавшихся между S_{max} и моментом t , количество стаявшего снега за этот период можно косвенно определить несколькими способами.

Уменьшение снеготпасов за оттепель можно определить по сумме положительных среднесуточных значений температур воздуха, умноженной на коэффициент стаивания снега, который находится в пределах 2,5–5,5 мм/°С в зависимости от степени залесенности бассейна. При этом учитывают площадь одновременного таяния снега, т. к. часто во время оттепелей положительная температура воздуха не поднимается высоко в горы.

Другой способ состоит в умножении слоя стока реки за период оттепели на величину, обратную коэффициенту стока. Доля расчета убыли снеготпасов за оттепель на Кавказе принимают величину коэффициента стока, равную примерно 0,5.

Прогностическое уравнения стока р. Ингури во втором квартале имеет следующий вид:

$$\bar{Q}_{t+5} = aS_t + bQ_t + C, \quad (21)$$

где S_t – запасы воды в снежном покрове, представляемые наблюдениями на снегомерных маршрутах в момент t ; Q_t – расход воды за март у с. Хаиши.

В третьем квартале происходит главным образом спад расходов воды, т.к. к этому времени стаивают основные запасы сезонного снега. В то же время реки Кавказа имеют значительное дождевое питание в течение всего теплого гидрологического года. Выход находится в установлении связей между последующим стоком с предшествующим. Для краткосрочных прогнозов расходов в течение третьего квартала у п. Каргалинское на р. Терек получено следующее уравнение:

$$\bar{Q}_{t+5} = 0,77\bar{Q}_t + 223, \quad (22)$$

где \bar{Q}_t – расход воды в момент составления прогноза у с. Каргалинского. Формально по этому уравнению прогнозы оцениваются на зависимой выборке коэффициентом корреляции около 0,75.

На спаде половодья в третьем квартале истощение стока поддается описанию с помощью экспоненциальной зависимости:

$$Q_{t+\Delta}^* + Q_0 = \frac{1}{n} \left[Q_t \sum_{j=1}^{j=n-3} \exp(-\alpha\Delta) + Q_0 \sum_{j=1}^{j=m-3} \exp(-\beta\Delta) \right], \quad (23)$$

где $Q_{t+\Delta}^*$ – средний расход воды за период заблаговременности (за исключением базисного); Q_0 – базисный расход воды в период, предшествующий прогнозу; Δ – заблаговременность прогноза, α и β – параметры, характеризующие скорости истощения базисного и надбазисного расходов воды.

Способы прогнозов стока рек и притока воды в водохранилища в течение четвертого и первого кварталов строятся в основном на тех же принципах, что и для третьего, т.е. участвуют связи со стоком за предшествующий квартал. На многих реках Сибири этот способ вполне работоспособен. Особенность прогнозов для четвертого квартала состоит в том, что в это время еще возможно выпадение жидких осадков и внезапные оттепели. Их влияние на сток в четвертом квартале удастся учитывать с привлечением прогноза температуры воздуха на период заблаговременности.

В последние годы для прогнозов стока в течение второго квартала и в период вегетации привлекаются данные, получаемые с искусственных спутников Земли (ИСЗ), с которых хорошо определяется граница снежного покрова в горах.

Высота расположения этой границы позволяет устанавливать зависимости с расходом воды за период вегетации. Для рек Средней Азии, например, где безоблачное небо способствует наблюдениям с ИСЗ, удастся получать уравнения следующего вида

$$Q_{t+\Delta} = f(B / H_{усл}, C, \Theta_{t+\Delta}) \quad (24)$$

где $H_{усл}$ – условная высота границы снега; B и C – параметры, определяемые эмпирически; $\Theta_{t+\Delta}$ – прогноз температуры воздуха на период заблаговременности.

Подобные же зависимости с использованием снимков покрытости гор снежным покровом удастся получать для горных регионов Сибири.

5. Краткосрочные прогнозы стока горных рек с использованием снежного покрова в горах

Одним из главных факторов стока воды рек горных регионов, как уже говорилось, являются накопленные запасы воды в снежном покрове. В то же время непосредственное их измерение связано с огромными трудностями и опасностями. Кроме того, неравномерность распределения снега в горах настолько высока, что редко расположенные снегопункты и даже маршрутные снегосъемки нередко дают весьма далекую от действительной величину снегозапасов для данной территории.

Анализ данных о выпадении осадков в высокогорьях за многие годы позволил выявить наиболее типичные черты, присущие распределению осадков по высотным зонам и в пределах высотных зон. На основе этого анализа удалось разработать формулы, позволяющие в общем виде аппроксимировать названные выше распределения осадков математическими выражениями, с помощью которых с определенной степенью точности производится интерполяция и экстраполяция осадков как по высоте бассейна, так и по площади высотной зоны. Аналогичные работы проводились для других важных факторов

стока – температуры воздуха, коэффициента стаивания снега, вертикального градиента температуры воздуха и др. Все это позволило получать математические модели для конкретных горных рек, в которых косвенные характеристики стокообразующих факторов заменяются приближенными расчетами самих факторов.

В настоящее время существует довольно значительное число математических моделей для расчета гидрографа горных рек. Гораздо меньше из них применяется для прогнозов. Главные отличия моделей состоят в степени детализации описания элементарных гидрологических процессов в бассейнах.

Ниже приводится одна из моделей, разработанная в Гидрометцентре России и реализованная для выпуска долгосрочных прогнозов стока. Она составлена из нескольких блоков, часть которых извлечена из моделей других авторов и модифицирована. Она же применима для составления краткосрочных прогнозов [4].

Один из блоков представляет собой расчет накопления и таяния снежного покрова, поступления талой и дождевой воды на поверхность почвы. В другом блоке представлены описания трансформации водоотдачи бассейна в гидрограф стока, включая расчет потерь на инфильтрацию и вычисление суммарного ожидаемого стока.

В упрощенном виде оба блока описаны ниже.

6. Расчет распределения осадков и снега в бассейне горной реки

Один из простых, доступных, но эффективных методов описания распределения осадков по высоте бассейна состоит из следующих процедур. По месячным суммам осадков на всех станциях бассейна и данным суммарных осадкомеров, расположенных на больших высотах, строятся графики зависимости осадков от высоты $X_i = f(H_{ij})$, где i – номер месяца; j – высота бассейна. Нередко для одного бассейна строится несколько обоснованных данными графиков. Для одной из горных рек, например, пришлось строить графики для западного и восточного склонов долины реки. Далее с графиков снимаются значения сумм осадков с равномерным распределением по высоте через 200–500 м. Эти данные служат для нахождения путем применения метода наименьших квадратов параметров k_1 и k_2 в формуле, в общем виде аппроксимирующей кривые распределения осадков с высотой:

$$X(H_{j,t}) = X(H_{o,t}) \cdot [1 + k_1 \cdot (H_j - H_0) + k_2 \cdot (H_j - H_0)^2], \quad (25)$$

где $X(H_{j,t})$ – количество осадков на высоте H_j в момент времени t ; H_0 – высота, на которой осадки должны быть известны по наблюдениям на метеостанциях.

Величины параметров k_1 и k_2 имеют выраженный внутригодовой ход, который описывается следующими выражениями

$$k_i = k_{i0} + A_i \cdot \cos \frac{2\pi}{T}(t - \tau_i), \quad (26)$$

где A_i , k_i , k_{i0} – параметры; t – время в сутках; T – число дней в году; i – номер параметра; τ – сдвиг по фазе.

Другой способ учета неравномерности распределения осадков по площади горного бассейна состоит в применении картограмм собственных векторов корреляционной матрицы полей сумм осадков за холодный период. Нахождение собственных векторов корреляционных матриц описано в библиотеке стандартных программ. Применение картографирования собственных векторов позволяет выделить районы, для которых следует производить оценку зависимостей осадков от высоты отдельно. На рис. 4 приводится один из примеров картограммы первого собственного вектора корреляционной матрицы поля сумм осадков для бассейна горной реки р. Нарын.

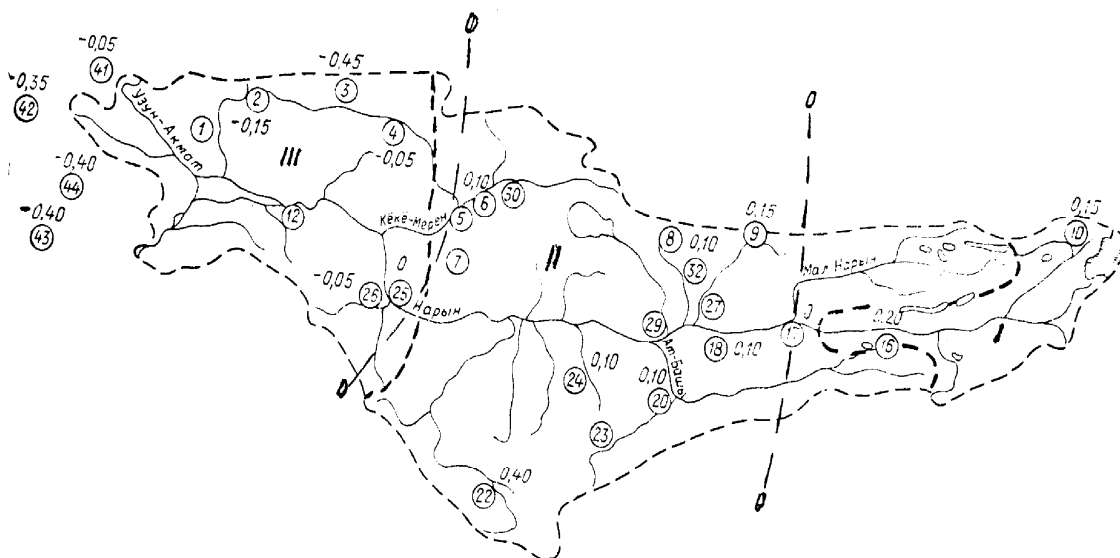


Рис. 4. Картограмма первого собственного вектора корреляционной матрицы поля сумм осадков за холодный период (р. Нарын).

7. Расчет неравномерности распределения запасов воды в снежном покрове высотной зоны и поступления талой воды на ее поверхность

В моделях поступления воды на поверхность бассейна необходимо учитывать не только вертикальную зональность распределения снежного покрова, но и неравномерность его распределения в каждой зоне. Эта неравномерность в значительной степени превосходит неравномерность залегания снега на равнинных бассейнах, что является одной из причин того, что в горном бассейне практически на протяжении всего периода снеготаяния

существует переменная снеговая пятнистость, простирающаяся на несколько километров по высоте. Неравномерность залегания и таяния снежного покрова в сочетании с его водоудерживающей способностью приводит к значительному несоответствию величин поступления талой воды на поверхность бассейна и интенсивности таяния снега.

Разработан способ расчета, позволяющий учесть оба названные выше обстоятельства. Водоотдача из снежного покрова вычисляется по формуле, в которую входит параметр, характеризующий водоудерживающую способность снега

$$q_T = h_T / (1 - \varepsilon_H), \quad (27)$$

где q_T – поступление талой воды, м³/с; h_T – слой талой воды, мм; ε_H – водоудерживающая способность снега, по литературным данным принимается в среднем равной 0,13.

Влажность снега $\varepsilon(t)$ вычисляется по выражению:

$$\varepsilon(t) = X_1(t) / S(t) \quad (28)$$

где $X_1(t)$ – количество талой воды в снежном покрове; t – порядковый номер суток, для которых производится расчет. Водоотдача из снега начинается с того момента, когда его влажность достигает критического значения ε_H .

Для математического описания распределения снежного покрова принято типовое распределение снега в 400-метровых зонах, полученное с помощью аэрофотосъемок.

Аппроксимация этого распределения выполнена в виде следующей экспоненты

$$P(S, h) = \exp\{-[S + S_p \ln(m) - h] / S\}, \quad (29)$$

где h – переменная, определенная на отрезке $[0, S_p \ln(m)]$; S_p – параметр, зависящий от высоты местности и численно равный значению среднего запаса воды в снежном покрове зоны, при котором она полностью покрывается снегом; m – постоянный параметр, равный 100.

Значение параметра S_p для каждой зоны играет важную роль, находится путем построения графических зависимостей типа

$$P(0, h) = f(S) = 100 \%, \quad (30)$$

т.е. связи покрытости зоны снежным покровом $P(0, h)$ и среднего запаса воды в снежном покрове в этой зоне. Значение S_p принимается равным пересечению линии связи прямой, показывающей 100% покрытость.

Величина S_p зависит не только от высоты, но и от изрезанности рельефа зоны.

В высоких горах величина S_p , как правило, меняется с 150 мм для зон высотой около 1 км до 1300–1700 мм на высотах 4,0–5,0 км. При отсутствии возможности построения

графических зависимостей типа (30), приведенные выше величины можно применить и для низких гор, учитывая распределение S_p по высоте с учетом изрезанности рельефа высотных зон.

В технологию разработки моделей формирования стока с целью их дальнейшего применения для составления прогнозов входит оптимизация (калибровка) ряда параметров, в процессе которой можно подвергнуть определению и величины S_p , приняв приведенные выше в виде начальных значений.

Таяние снега рассчитывается по формуле (2) только при положительных среднесуточных температурах воздуха. Однако в горах нередко наблюдается возврат холодов, и тогда талая вод под снегом замерзает, а это оказывает заметное влияние на водоотдачу снежного покрова и бассейна в целом. Для расчета замерзания воды, удерживаемой снегом, применяется следующая эмпирическая формула

$$X_2(t) = 1,55 \sqrt{0,99 \cdot |\Theta_{min}(t)|}, \quad (31)$$

где $X_2(t)$ – количество замерзшей воды в t -ые сутки сутки; $|\Theta_{min}(t)|$ – абсолютная величина минимальной температуры воздуха в течение суток.

Минимальная температура воздуха имеет хорошую связь с ее среднесуточной величиной

$$\Theta_{min} = 0,91 \cdot \bar{\Theta} - 3, \quad (32)$$

где $\bar{\Theta}$ – среднесуточная температура воздуха.

Учет свойства влажности снежного покрова и замерзания воды при возврате холодов приводят к улучшению расчета гидрографа.

Для расчета интенсивности снеготаяния за декадный период разработана следующая процедура. Установлены связи между средними декадными температурами воздуха Θ и суммами положительных значений средних суточных температур воздуха $\sum_{t=1}^{t=10} \Theta_t^+$ за те же декады. Эти связи аппроксимированы приближенными выражениями линейного типа

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{t=1}^{t=10} \Theta_t^+ = \Theta + 5^\circ \text{C}, \quad \text{при } \Theta = -5 \dots 0^\circ \text{C}; \\ \sum_{t=1}^{t=10} \Theta_t^+ = 9 \cdot \Theta + 5^\circ \text{C}, \quad \text{при } \Theta = 0 \dots +5^\circ \text{C}; \\ \sum_{t=1}^{t=10} \Theta_t^+ = 10 \cdot \Theta, \quad \text{при } \Theta > +5^\circ \text{C}. \end{array} \right. \quad (33)$$

В соответствии с этими зависимостями выражения для слоя талой воды имеют следующий вид:

$$\begin{cases} H_T = k(\Theta + 5), & \text{при } \Theta = -5 \dots 0^\circ \text{C}; \\ H_T = k(9 \cdot \Theta + 5), & \text{при } \Theta = 0 \dots +5^\circ \text{C}; \\ H_T = k(10 \cdot \Theta), & \text{при } \Theta > +5^\circ \text{C}. \end{cases} \quad (34)$$

Расчеты производятся для гор в зависимости от их залесенности при k равном 3 или 5 мм/(°C сут).

Количество талой воды, которая поступает от ледников, рассчитывается при k , равном 9 мм/(°C сут).

Общее поступление воды на поверхность бассейна $Q(t)$, м³/с, складывается из величин:

$$\begin{aligned} q_n(t) &= q_T(t) + q_n(t) + q_d(t) \\ Q(t) &= \sum_{i=1}^n q_n(t) f_i \end{aligned} \quad (35)$$

где $q_n(t)$ – объем воды, поступившей на площадь высотной зоны в единицу времени t , м³/с; f_i – площадь высотной зоны.

Для паводков на притоках р. Кубань были построены карты распределения осадков по площади бассейнов рек. Их анализ показал, что расположение «ядра» дождя (т.е. области выпадения наибольшего слоя стокоформирующих осадков) отражается на режиме прохождения паводка и его максимальных расходах. Кроме этого, реакция бассейнов на поступление примерно одного и того же слоя осадков неоднозначна. Определяющим в данном случае является увлажненность бассейна, которая и определяет коэффициент стока. Причем в большей степени на коэффициент стока влияет увлажнение бассейна в период таяния снега.

Из всего сказанного можно сделать следующие заключения:

- сильные и опасные паводки в створе одного из притоков формируются при прохождении значительных паводков на всех притоках, т.е. условия их формирования связаны с синоптической ситуацией на значительной территории;
- максимальные уровни паводков зависят от расположения ядра ареала дождя, вызвавшего паводок, слоя и интенсивности дождя;
- высота паводка и его объем в основном определяются условиями увлажнения бассейнов перед выпадением дождя.

Одним из перспективных направлений развития методов прогноза стока за паводок является использование численных методов прогноза поля сильных осадков с выделенным «ядром» дождя, положение которого и определяет особенности прохождения паводка. Определяющую роль в формировании летних дождевых паводков играют неравномерность выпадения осадков на водосбор, а также особенности стекания воды в горных районах. Это

приводит к тому, что в настоящее время основным методом прогнозов паводков остаются эмпирические методы. Они позволяют в некоторой степени преодолеть указанные трудности за счет привлечения данных наблюдений за многолетний ряд и получения эмпирических зависимостей характеристик паводка от характеристик слоя осадков, формирующих паводок. Одной из характеристик паводка является приращение стока, рассчитываемое как разность между расходом воды накануне паводка и в последующие сутки или максимальным его значением.

Пик суточных расходов быстро развивающихся паводков на сравнительно небольших юго-западных притоках р. Кубань, как правило, наблюдается на следующие сутки после начала выпадения сильного дождя. Такие случаи хорошо описываются экспоненциальной аппроксимацией истощения бассейновых запасов воды (включая, русловые) и поступлением талой и дождевой воды в основное русло притока.

Аналитическое описание этого процесса выглядит следующим образом [5]:

$$Q_{t+\Delta} - Q_{\bar{0}} = (Q_t - Q_{\bar{0}}) \exp(-\Delta t) + \alpha_1 q_t + \alpha_2 q_{t+\Delta}, \quad (36)$$

где $Q_{t+\Delta}$ – прогнозируемый суточный расход воды, м³/с; Q_t – суточный расход воды в момент составления прогноза; $Q_{\bar{0}}$ – средний расход воды, характеризующий базисный сток; q_t и $q_{t+\Delta}$ – поступления талой и дождевой воды к притокам в момент составления прогноза t и в момент осуществления прогноза $(t + \Delta)$; Δ – период заблаговременности прогноза, сут; α_1, α_2 – параметры.

После простых преобразований и ряда допущений последнее уравнение можно представить иначе:

$$Q_{t+\Delta} = aQ_t + \alpha(q_t + q_{t+\Delta}) + (Q_{\bar{0}} + a_1Q_{\bar{0}}). \quad (37)$$

Заменим q осадками X , $(Q_{\bar{0}} + a_1Q_{\bar{0}})$ – постоянной величиной C , в левой части уравнения $Q_{t+\Delta} - aQ_t \approx \Delta Q_{t+\Delta}$, тогда получим простые варианты уравнения (36):

$$\Delta Q_{t+\Delta} = \alpha(X_t + X_{t+\Delta}) + C \quad (38)$$

или

$$\Delta Q_{t+\Delta} = \alpha(X_t) + C. \quad (39)$$

Уравнения (38) и (39) применялись далее для получения прогностических уравнений.

Известно, что срочные значения расхода воды могут в 1,5–2 раза превышать их суточные максимальные величины, особенно на горных реках. Так, для р. Псекупс – п. Горячий Ключ значение расхода воды, при котором паводок будет опасным (т.е. уровень воды в реке станет равным или превысит уровень ОЯ), принят расход воды, равный 280 м³/с

(суточный расход) вместо $500 \text{ м}^3/\text{с}$ (срочный), соответствующего уровню ОЯ на кривой расходов. Вероятность того, что максимальный срочный расход воды за время паводка будет больше или равен $500 \text{ м}^3/\text{с}$ при среднесуточном расходе больше или равном $280 \text{ м}^3/\text{с}$ составляет 84 %. Это, указывает на то, что при максимальном среднесуточном расходе воды в створе п. Горячий Ключ на р. Псекупс, большем или равном $280 \text{ м}^3/\text{с}$, дождевой паводок будет опасным. При среднесуточном расходе от 200 до $280 \text{ м}^3/\text{с}$ вероятность превышения уровня ОЯ в створе составляет около 10 %.

Вопрос о соотношении максимальных уровней за паводок и соответствующих им расходах воды в гидрологических створах требует дальнейшего исследования, т.к. без его учета данные о значительном числе паводков, уровни которых превысили опасные отметки, не участвуют в выборке, по которой разрабатываются эмпирические зависимости. Данный факт определенным образом сказывается на качестве получаемых прогностических методик.

Ниже приводятся эмпирические зависимости в нескольких вариантах их осуществления для притоков р. Кубани. Наибольшую площадь и среднюю высоту водосбора имеет р. Белая до п. Каменноостская. Сток достигает максимальных величин в первый день паводка, в который проходит около 45 % его объема, сформированного суточным дождем.

На рис. 5 показан вариант, когда показатель слоя осадков X , мм, участвующих в формировании паводка, рассчитывался как сумма осадков за двое суток – сутки накануне начала паводка и первые сутки паводка, на которые составлялся прогноз.

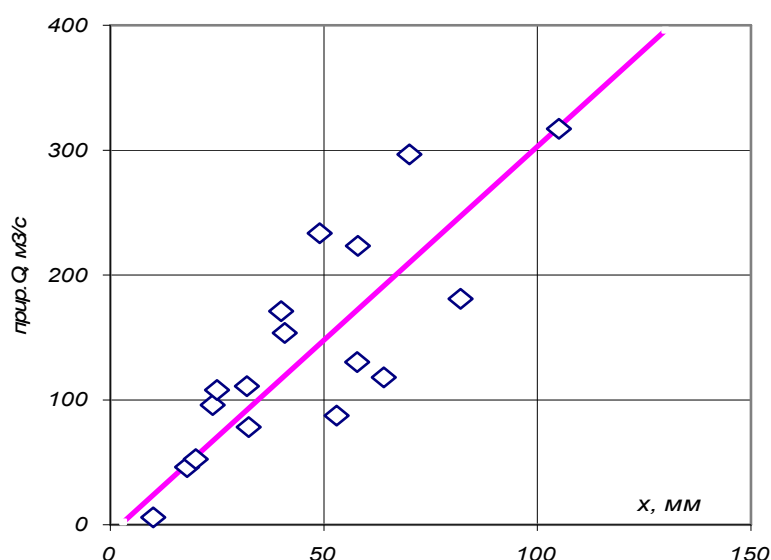


Рис. 5. Зависимость приращения расхода воды в первые сутки паводка от суммарного слоя осадков, выпавших накануне и в день паводка, на водосбор для р. Белая – Каменноостская.

Уравнение для прогноза приращения расхода воды за первые сутки паводка на р. Белой в п. Каменноостская в зависимости от суммы осадков, выпавших накануне и в первый день паводка:

$$\Delta Q = 2,8X + 12,9, \quad (40)$$

Коэффициент корреляции этой зависимости составил 0,82. Если не учитывать распределение количества выпадающих осадков по высоте местности и рассчитывать показатель X как среднее по трем станциям, то коэффициент снижается до 0,65.

Зависимость приращения расхода воды на р. Пшехе в п. Апшеронск в первый день паводка аналогична зависимости (40):

$$\Delta Q = 1,84X + 20,1. \quad (41)$$

Во втором варианте, в отличие от приведенных выше зависимостей ΔQ от слоя осадков, выпавших накануне и в первые сутки паводка, зависимость для р. Пшиш в п. Хадыженск получена по слою осадков только за первые сутки паводка. Привлечение величин осадков накануне паводка приводит к резкому ухудшению качества зависимости, что, скорее всего, связано с особенностями формирования дождевых паводков на данном водосборе (например, высокая степень залесенности – более 90%, особенности почвенного покрова и пр.).

Зависимость приращения расходов воды на одни сутки на р. Пшиш в п. Хадыженск имеет следующий вид:

$$\Delta Q = 2,18X - 26,6, \quad (42)$$

где X – осадки в день паводка. Коэффициент корреляции для нее равен 0.86.

Существует также зависимость максимального суточного слоя стока за паводок на р. Псекупс в створе п. Горячий Ключ от слоя поступления воды на водосбор.

Следующая зависимость, полученная по связи суммы осадков и талой воды, имеет следующий вид:

$$y = 0,28(X + h) + 15,9, \quad (43)$$

где h – слой талого стока.

Эта зависимость позволяет прогнозировать максимальный суточный слой стока за паводок на р. Псекупс в п. Горячий Ключ, так как коэффициент корреляции для нее равен 0,71.

Довольно высокая теснота связей полученных эмпирических зависимостей свидетельствует о возможности их использования для прогнозов максимального паводочного стока юго-западных притоков р. Кубани при наличии хороших прогнозов X и h .

Эмпирический способ краткосрочного прогноза максимального стока за половодье удается построить, используя нелинейные, в частности квадратичные типа $y(q)=aq^2+bq+c$, зависимости его от суммы осадков за время выпадения дождя и от предпаводочного стока, который служит косвенным показателем влагоемкости бассейна перед выпадением дождя. Аппроксимация такой зависимости приводится в табл. 1.

Таблица 1

Коэффициенты квадратической аппроксимации зависимости максимального слоя стока за паводок (y , мм) р. Фарс – п. Дондуковская от предпаводочного слоя стока (q , мм) и суммы осадков за время выпадения дождя, вызвавшего паводок (X , мм)

Коэффициенты аппроксимации			q , мм	X , мм
a	b	c		
-7,5	449	0,0	<4	35–50
-0,16	43,38	65,0	>4	35–50
-3,0	425,0	0,0	<4	25–35
-0,12	3,25	41,0	>4	25–35
-0,5	48,0	0,0	<4	0–25
-0,22	5,12	7,0	>4	0–25

В этой зависимости сумма осадков за время выпадения дождя подразделяется на три градации: 0–25 мм, 25–35 мм, 35–50 мм, что улучшает точность зависимости. Слой стока, предшествующий паводку, вначале до определенной величины (4 мм) относительно хорошо характеризует будущие потери стока, а затем его влияние идет на убыль тем скорее, чем больше осадков выпадет за паводок.

На рис. 6 приводится зависимость срочных и максимальных расходов от максимальной интенсивности выпадения дождя и влагоемкости бассейна накануне паводка.

В дальнейшем, скорее всего, необходимо строить исследования на разработке и использовании методов прогнозов полей осадков, привязки их «ядер» к конкретным местностям, а также наращивать детализацию разработок всех видов прогнозов для такой сложной системы, как бассейн Кубани.

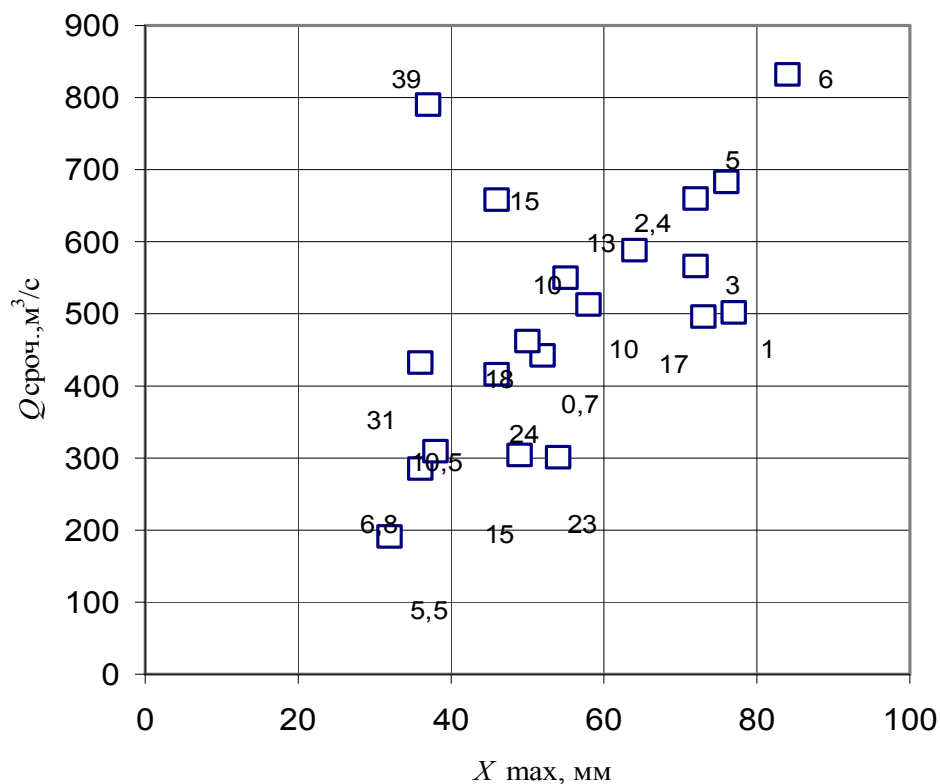


Рис. 6. Зависимость срочных максимальных расходов от максимального слоя дождя и влагоемкости бассейна накануне паводка (числа у точек).

Для нескольких пунктов по длине р. Кубани получена система прогностических уравнений с заблаговременностью от одних до четырех суток. Для нескольких ее притоков удалось получить уравнения для прогнозов в основном на одни сутки, а для больших притоков в нижних пунктах – на двое суток. Коэффициенты определялись методом регрессии. В табл. 2 приводится ряд уравнений и оценка их точности на независимых данных. В уравнения входят $Q(t)$ – расход в день составления прогноза в данном пункте; $Q(t+1)$ – прогноз на одни сутки; t° – температура воздуха, средняя по бассейну в день составления прогноза (средняя за предшествующую пятидневку); $P(t)$ – суммы осадков, средние по вышележащему бассейну в день составления прогноза; $P(t+1)$ – прогноз этих сумм в период осуществления прогноза.

**Уравнения и оценка их точности по S/σ для прогнозов расходов воды на реке Кубань с
заблаговременностью одни сутки (на независимой выборке)**

	S/σ	Уравнение
р. Кубань – с. им. Коста-Хетагурова P, t° – Теберда, Клухорский, Черкесск	0,3	$Q(t+1) = 0,63P(t+1) + 0,37t^\circ + 1,03P(t) + 0,92Q(t) + 2,7$
р. Кубань – х. Дегтяревский P, t° – Невинномыск, Черкесск, Отрадная	0,5	$Q(t+1) = 1,55P(t+1) - 0,20t^\circ + 1,61P(t) + 0,82Q(t) + 18,4$
р. Кубань – г. Армавир P, t° – Армавир, Невинномыск, Лабюинск	0,4	$Q(t+1) = -0,23P(t+1) - 0,16t^\circ + 3,90P(t) + 0,91Q(t) + 6,0$
р. Кубань – ст. Ладожская P, t° – Лабинск, Усть-Лабинск, Майкоп	0,4	$Q(t+1) = -0,55P(t+1) - 0,90t^\circ - 0,11P(t) + 0,95Q(t) + 33,4$

8. Описание процесса стекания воды и потерь стока в горном бассейне

Как уже было отмечено, процесс стекания воды в горных бассейнах происходит, в отличие от равнинных рек, в особых условиях. Одно из главных отличий состоит в больших уклонах бассейна горной реки, что вызывает повышение скорости движения воды по поверхности бассейна. Другое отличие – распространенность рыхлых, обломочных пород, через которые вода легко проникает в нижние горизонты, но стекает там по водоупорам гораздо медленнее. В связи с этим процесс может быть описан минимум в виде двух линейно соединенных емкостей линейно регулирующих прохождение по ним воды.

Приведем два подхода, построенных на предположении, что вода проходит через две емкости.

В первом подходе использовано описание процесса стекания воды к створу реки с помощью дифференциального уравнения второго порядка относительно расхода воды в замыкающем створе, которое после ряда преобразований приводится к следующему конечно-разностному виду:

$$Q(t) = a_1 \cdot Q_{t-1} + a_2 \cdot Q_{t-2} + b_1(0,5q_{t-1} - 2q_{t-2}) + b_2 \cdot q_t \quad (44)$$

где a_1, a_2, b_1 и b_2 – параметры, определяемые по входным $q_t = q_n(t)$ и выходным $Q(t)$ данным с помощью методов оптимизации.

Графически двух объемная модель стекания воды выглядит следующим образом (рис. 7).

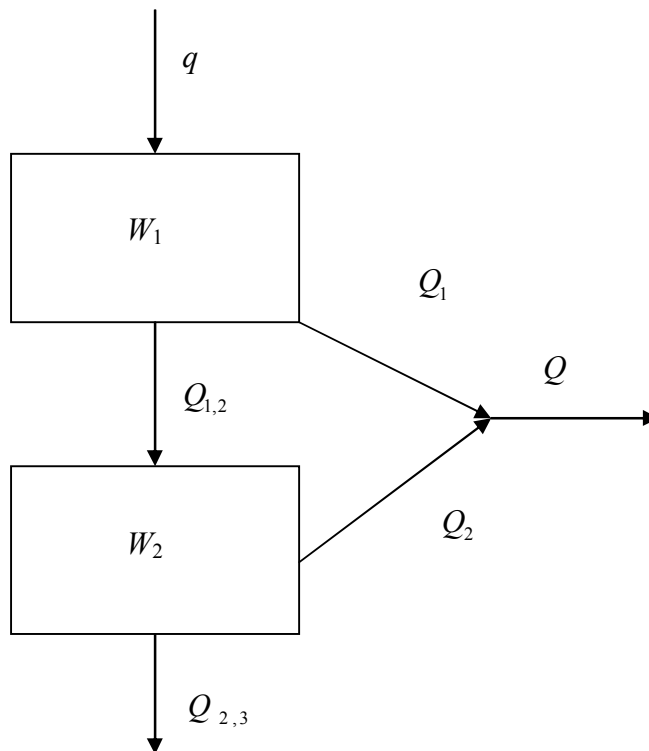


Рис. 7. Схема регулирования стока двумя емкостями в бассейне горной реки.

Взаимосвязи, представленные на рис. 7, выглядят следующим образом:

$$Q_1 = c_1 W_1; \quad Q_2 = c_2 W_2; \quad Q_{1,2} = c_{1,2} W_1; \quad Q_{2,3} = c_{2,3} W_2; \quad Q = Q_1 + Q_2, \quad (45)$$

где q – поступление воды на поверхность бассейна; Q_i – расходы воды из емкостей; W_i – объемы емкостей; c_i – параметры истощения воды из регулирующих емкостей.

Другой подход, описывающий стекание воды в горном бассейне, основан на сочетании двух емкостей, регулирующая способность каждой из которых представлена известной в гидрологии кривой добегания Г.П. Калинина – П.И. Милюкова:

$$Q(t) = \int_0^t q(\tau) P_1(t - \tau) d\tau + (1 - \beta) \int_0^t q(t) P_2(t - \tau) d\tau, \quad (46)$$

где $P_1(t)$ и $P_2(t)$ – кривые добегания для первой и второй емкостей; β – доля поступления воды, проходящей через первую емкость. При этом имеется в виду параллельное соединение емкостей.

При параллельно-последовательном соединении емкостей кривая добегания $P_2^*(t)$ представляет собой свертку кривой добегания $P_1(t)$ для первой емкости с кривой добегания $P_2(t)$ для второй емкости:

$$P_2^*(t) = \int_0^t P_1(\tau_2) P_2(t - \tau) d\tau. \quad (47)$$

9. Потери стока в горах

Как правило, для горных районов рассчитывают суммарные потери стока, связывая их величину с количеством снега в горах. Например, строится зависимость коэффициента стока η за период вегетации от запасов воды в снежном покрове в каждой зоне или во всем бассейне в конце марта. Затем по этой зависимости для конкретного года применяется уравнение типа:

$$q_{\sigma,ij}(t) = \eta_j q_{ij}(t), \quad (48)$$

где j – номер года; i – номер высотной зоны; $q_{\sigma}(t)$ – эффективное поступление воды на поверхность высотной зоны (поступление воды за вычетом потерь) в момент t .

Другое уравнение позволяет учитывать динамику потерь стока в течение половодья

$$q_{\sigma}(t) = q(t) - q(t) \exp\left[-\alpha S \int_0^t q(\tau) d\tau\right], \quad (49)$$

где α – параметр.

Уравнение (49) показывает, что чем больше снега в горах, тем меньше относительные потери стока, и, с другой стороны, чем больше стаяло снега – интегральная величина $q_{\sigma}(t)$ поступления воды, тем больше коэффициент стока или меньше потери стока.

Еще один пример учета потерь стока в горах демонстрирует уравнение:

$$Q(t) = \psi \int_0^t q(\tau) P_1(t - \tau) d\tau + (\eta - \psi) \int_0^t q(\tau) P_2(t - \tau) d\tau; \quad \psi = \beta \eta, \quad (50)$$

где $Q(t)$ – расход воды в замыкающем створе реки, м³/с; $P_1(t)$ – кривая добегания для первой регулирующей емкости стекания воды в пределах бассейна; $P_2(t)$ – кривая добегания для второй емкости, через которую вода стекает медленнее, чем через первую; η – коэффициент стока для всей системы; β – доля поступления воды, проходящей через первую емкость (при параллельном соединении емкостей).

Величина η своя для каждого бассейна и меняется по годам. В горах η имеет высокие значения, чем выше бассейн, тем больше величина η . При невозможности вычислить η по архивным данным или путем оптимизации, в среднем ее принимают равной примерно 0,75.

Концепция постоянства коэффициента стока η применима для тех рек, на которых выпадает сравнительно мало летних осадков, а влажность почвы оказывает слабое влияние на потери стока.

10. Краткосрочные прогнозы стока, основанные на модели формирования стока

Анализ результатов расчетов гидрографов горных рек показал, что, во-первых, сток через вторую емкость (рис. 7) (условно говоря, подземный или сильно регулируемый) составляет в среднем около 50 % общего за период вегетации стока; во-вторых, время добегания его (временной интервал между центрами тяжести гидрографа поступления воды на поверхность бассейна и стоком воды через вторую емкость) составляет величину порядка месяца и более. Гидрографы стока горной р. Варзоб (площадь водосбора 1200 км²) приведены на рис. 1: рассчитанный по двум регулирующим емкостям одновременно (2) и только по второй емкости (3), здесь же приведен фактический гидрограф (1).

Описанное явление позволяет при разработке метода прогноза учитывать медленно стекающую часть талой воды, которую можно прогнозировать по данным расчета снегозапасов еще в марте-апреле. Кроме того, снег, накопившийся в высокогорьях, тает гораздо позже (в мае-июле), чем в нижних зонах, и он определяет в большей степени сток после пика половодья – в июле-сентябре. Конечно, в горах, в которых осадки выпадают в основном в жидком виде летом, гидрограф имеет пилообразный характер, и долговременные факторы стока в гораздо меньшей степени влияют на его форму.

Оба долговременных фактора позволяют для многих горных районов составлять так называемые прогнозы на пятидневку.

Для прогноза расходов воды на период заблаговременности Δ применяется уравнение следующего типа:

$$Q_{t+\Delta} = (Q_t - Q_0) \exp(-\alpha\Delta) + b_1 q_t + b_2 q_{t+\Delta} + Q_0, \quad (51)$$

где Δ – заблаговременность прогноза; Q_0 – расход воды, характеризующий базисный сток; α – параметр истощения воды, накопленной в бассейне, включая русла рек; q_t и $q_{t+\Delta}$ – поступление воды на поверхность бассейна за предшествующий период, в конце которого составляется прогноз, и за период заблаговременности прогноза соответственно; b_1 и b_2 – параметры.

Для калибровки параметров уравнения (51) применяются как простые методы, так и методы оптимизации.

В первом случае строятся связи $Q_{t+\Delta} = f(Q_t)$ по средним за пятидневку расходам воды для периода спада половодья, по нижней огибающей графика определяют величину параметра α .

В уравнении (51) требуется также знать $q_{t+\Delta}$ – поступление воды за период заблаговременности. Обычно вычисляется приближенная величина $\bar{q}_{t+\Delta} = f(S_t, X_{t-5})$ в зависимости от количества снега, оставшегося в бассейне к моменту составления прогноза, и осадков, выпавших на снег за предшествующий и прогнозный периоды.

Зависимости поступления воды на поверхность бассейна от запасов воды в снежном покрове следующего вида

$$q_{t+\Delta} = f(S_t) \quad (52)$$

Уравнения этого вида особенно эффективны для высоких гор в период с июня по сентябрь. Для низких гор этот период короче.

Тесноту зависимостей типа (52) для июля определяет прежде всего количество снегов запасов, так как их уже не так много, как в апреле, когда главную роль играет температура воздуха.

На рис. 8. представлена одна из зависимостей для $q_{t+\Delta} = f(S_t)$ для июля.

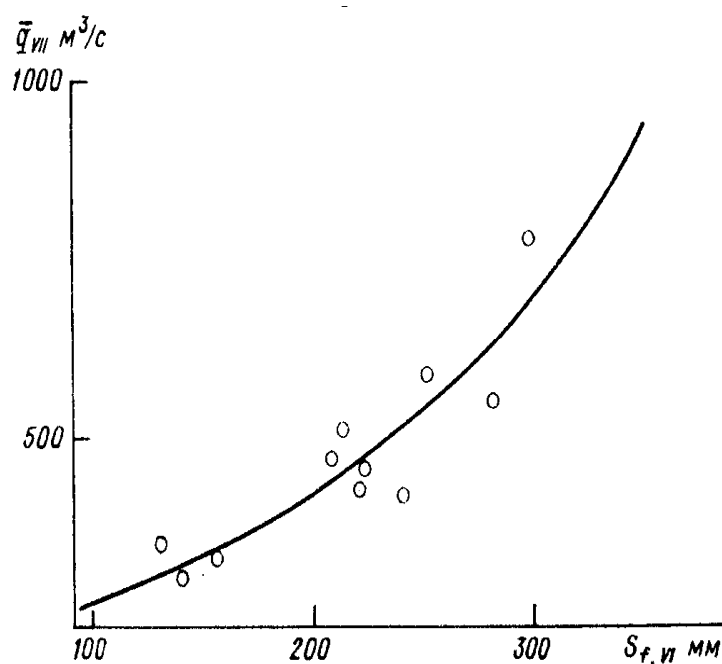


Рис. 8. График зависимости $q_{t+\Delta} = f(S_t)$ для прогноза стока р. Нарын в июле.

Для лучшего учета нелинейности связей между запасами снега и будущим стоком предварительно строятся графические зависимости следующего вида

$$(Q_{t+\Delta} - Q_{\sigma}) - (Q_t - Q_{\sigma}) \exp(-\alpha\Delta) = f(S_t). \quad (53)$$

Подобная зависимость приведена на рис. 9.

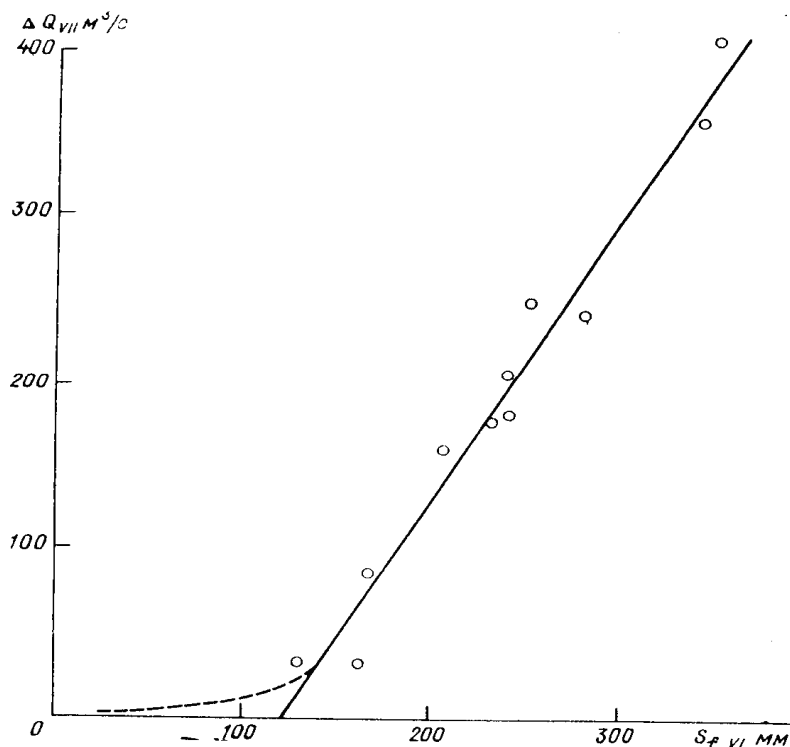


Рис. 9. График зависимости $(Q_{t+\Delta} - Q_{\sigma}) - (Q_t - Q_{\sigma}) \exp(-\alpha\Delta) = f(S_t)$ для прогноза стока р. Нарын.

Другой более сложный способ определения параметров прогностических уравнений заключается в применении специальных способов их оптимизации. Наряду с достоинствами этот способ имеет и свои недостатки, в частности, для его применения требуются более длинные ряды наблюдений.

Описанный подход к составлению краткосрочных прогнозов стока горных рек с помощью математической модели позволяет при прогнозах распределения стока в период залегания снежного покрова реализовать информацию об особенностях распределения снежного покрова по высоте бассейна и в пределах высотных зон. Алгоритм позволяет учитывать влияние оттепелей, которые приводят к уменьшению снеготпасов по сравнению с суммами осадков за календарный срок. Наиболее отчетливо преимущество применения модели проявляется, когда таяние достигает высотных зон, для которых снеготпасы

рассчитываются. Математическое моделирование позволяет выпускать прогнозы в вероятностном виде путем привлечения прогнозов погоды и разыгрывания различных сочетаний (в том числе и экстремальных) гидрометеорологических факторов на период заблаговременности. Кроме того, математические модели формирования позволяют оценить влияние изменения климата на сток и организовать вычисления таким образом, чтобы выявить факторы, которые могут приводить к катастрофическим ситуациям.

Уравнение для прогноза объема стока через створ реки за период 5–10 суток в период вегетации, на период вегетации или до его окончания выглядит в общем виде:

$$\bar{Q}_{t+\delta} = \delta Q_{\bar{o}} + \sum_{i=1}^{i=\delta} (Q_t - Q_{\bar{o}}) \exp(-\alpha i) / \delta + a_1 q_{t-d} + a_2 \sum_{i=1}^{i=\delta} q_{t+\delta} + C, \quad (54)$$

где $\bar{Q}_{t+\delta}$ – средний расход воды за период, на который составляется прогноз, м³/с; Q_t – расход воды за период, предшествующий моменту составления прогноза t ; i – порядковый номер суток в периоде, на который составляется прогноз; δ – общее количество суток, входящих в период, на который составляется прогноз; q_{t-d} – поступление воды на поверхность бассейна за какой-либо период d , предшествующий моменту составления прогноза, м³/с; $q_{t+\delta}$ – поступление воды на поверхность бассейна за период заблаговременности прогноза, м³/с; α – параметр интенсивности истощения запасов воды в бассейн; a_1 , a_2 и C – параметры определяемые подбором, методом, описанным ранее или методом оптимизации.

Для определения параметров, от величины и соотношения которых во многом зависит точность прогнозов, уравнение (54) упрощается следующим образом:

$$\bar{Q}_{t+\delta} = a_1 q_{t-d} + a_2 S_t + C, \quad (55)$$

где S_t – запас воды в снежном покрове на момент составления прогноза t . Тогда a_1 , a_2 и C можно найти с помощью метода наименьших квадратов.

Прогноз составляется по уравнениям следующего вида

$$Q_{t+\delta} = b_1 Q_t + (1 - b_1) Q_{\bar{o}} + a_1 \cdot q_{t-d} + S_t + C, \quad (56)$$

где b_1 – постоянный параметр, который определяется по вычисленному заранее коэффициенту истощения α с помощью равенства

$$b = \sum_{i=1}^{i=\delta} \exp(-\alpha i) / \delta. \quad (57)$$

Прогностическая зависимость для притока воды в Токтогульское водохранилище в период второго квартала имеет вид

$$\bar{Q}_{t+\Delta} = 0,21\bar{Q}_t + 0,79Q_{\bar{o}} + 3,06S_t + 153, \quad (58)$$

где $t+\Delta$ – обозначение номера квартала; t – обозначение номера месяца.

Анализ величин параметров в прогностических уравнениях показывает, что степень влияния снегозапасов максимальна в июне, в других месяцах она снижается. Поступление воды на поверхность бассейна также имеет меньшее влияние в конце периода вегетации, а доля Q_6 увеличивается.

11. Прогнозы стока горной реки в вероятностном виде

В вероятностной форме можно составлять прогнозы несколькими методами. Перечислим некоторые из них. Для дождевых паводков применяют прогноз осадков на период заблаговременности гидрологического прогноза в виде кривой распределения этих осадков либо в альтернативном виде (наличие или отсутствие осадков). Применяется также климатический или инерционный вид прогноза осадков и температуры воздуха или притока воды к руслу по климатической кривой истощения запасов воды в бассейне или по последнему значению расхода воды притока. Для краткосрочных прогнозов эти методы достаточно эффективны.

В «Наставлении по службе прогнозов» рекомендуется прогноз представлять в виде кривой обеспеченности с учетом различной вероятности погрешности прогноза.

Для представленной в этом разделе модели разработан метод вероятностного прогноза стока горной реки на заданный период, реализуемый путем задания ряда вариантов (ансамбля) хода метеорологических элементов погоды во времени на период заблаговременности. (Далее в тексте искусственно задаваемый ход метеорологических элементов будем называть «метеорологический сценарий» или просто «сценарий»).

Основой метода может служить любая модель формирования стока в горах, в том числе представленная выше. Напомним, что суть составления прогноза состоит в расчете с помощью модели запасов воды в снежном покрове по высоте бассейна к моменту составления прогноза. Уравнения для прогноза в неявном виде учитывают, что количество осадков и температура воздуха за период заблаговременности близки к их средним многолетним значениям.

Таким образом в качестве начальных условий для составления прогноза служат фактические расходы, рассчитанные поступления воды на поверхность бассейна и рассчитанное распределение снегозапасов по высотным зонам на момент составления прогноза.

Одним из основных вопросов при вероятностном прогнозировании является возможность предвычисления стока редкой повторяемости, которые приводят к экстремальным ситуациям на водных объектах. К таким ситуациям относятся основные две:

- 1) когда приток воды настолько велик, что может вызвать переполнение водохранилищ, затопление жилых и хозяйственных объектов и другие катастрофические последствия;
- 2) когда сток слишком мал и водохранилища могут остаться незаполненными (особенно остро развивается такая ситуация после одного или нескольких засушливых предшествующих лет).

Исходя из сказанного, вероятностный прогноз составляется следующим образом.

Составляются метеорологические сценарии, которые должны приводить к сочетанию стокоформирующих факторов редкой повторяемости:

1) максимально возможные осадки $X_{max,i}$ в течение всего периода заблаговременности в сочетании с максимальными наблюдавшимися в каждой декаде температурами воздуха $\Theta_{max,i}$;

2) осадки $X_{max,i}$ в сочетании со средней температурой воздуха $\bar{\Theta}_i$;

3) осадки $X_{max,i}$ в сочетании с минимальной наблюдавшейся температурой воздуха $\Theta_{min,i}$

4) $\bar{X}_i - \Theta_{max,i}$;

5) $\bar{X}_i - \bar{\Theta}_i$;

6) $\bar{X}_i - \Theta_{min,i}$;

7) $X_{min,i} - \Theta_{max,i}$;

8) $X_{min,i} - \bar{\Theta}_i$;

9) $X_{min,i} - \Theta_{min,i}$.

Исследования показывают, что перечисленные в сценариях среднедекадные элементы погоды между собой корреляционно не связаны.

При низких положительных температурах воздуха и большом количестве осадков снег тает в нижних зонах и в то же время накапливается в верхних, так как здесь температуры воздуха отрицательные. В июне наблюдаются, как правило, высокие температуры воздуха, начинается бурное таяние снега, накопившегося в стокоформирующих и верхних зонах. Такой эффект наблюдается даже при температурах воздуха, равных средним многолетним их значениям. При этом в верхних зонах потери стока на инфильтрацию в почву заметно меньше, чем в нижних, в связи с чем коэффициент стока в течение гидрологического года меняется от 0,2 в апреле до 0,55–0,7 в июне–июле.

Эти же причины вызывают разницу в величинах прогнозируемых расходов воды при различных метеорологических сценариях, так как при сценарии) $X_{max,i} - \Theta_{min,i}$ снега успевает накопиться больше (иногда значительно больше) из-за увеличения

продолжительности холодного периода в верхних зонах. При сценарии же $X_{max,i} - \Theta_{max,i}$ увеличивается продолжительность теплого периода, и осадки часто выпадают в жидком виде.

На рис. 10 приводятся вероятностные прогнозы для притока воды в Токтогульское водохранилище в период вегетации.

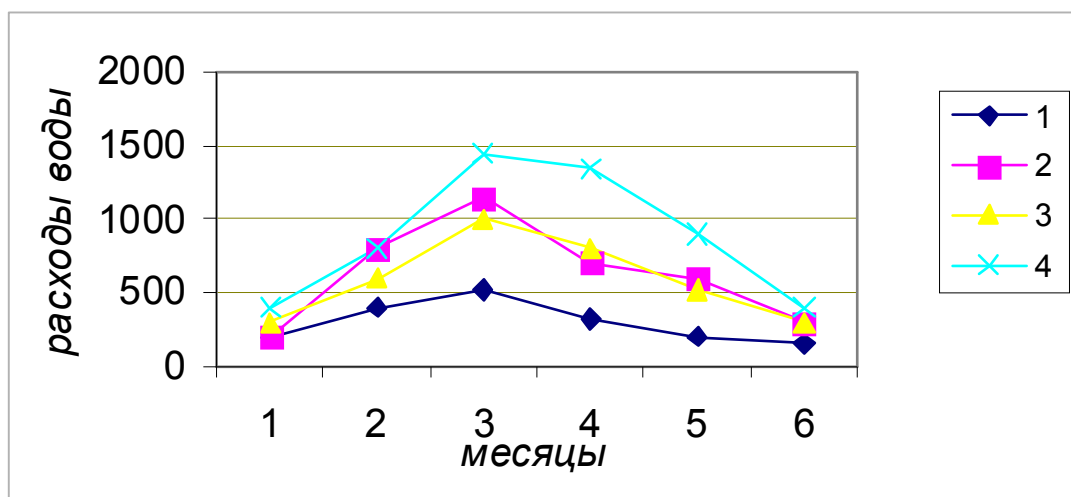


Рис. 10. Ансамбль прогнозов притока воды в Токтогульское водохранилище в период вегетации: 1) при минимально возможных осадках (X_{min}); 2) фактический (X_{ϕ}); 3) по среднелетним (\bar{X}); 4) по максимально возможным осадкам (X_{max}).

Анализ результатов расчетов для многоводного года показал, что в апреле, мае и июне прогноз по сценарию с максимально возможными осадками и минимальными температурами воздуха на период заблаговременности оказался весьма близок к фактическому, а в мае даже совпал с ним.

Таким образом можно сказать, что потребителям гидрологических прогнозов вероятностная их форма полезна и позволяет предусмотреть мероприятия для снижения ущерба от крупных наводнений.

Список использованных источников

1. Денисов Ю.М. Схема расчета гидрографа стока горных рек. – Л.: Гидрометеиздат, 1965. – 295 с.
2. Доброумов Б.М., Тумановская С.М. Наводнения на реках России: их формирование и районирование // Метеорология и гидрология. – 2002. – № 12. – С. 70–78.
3. Комаров В.Д., Мухин В.М., Полунин А.Я. Модель формирования снежного покрова и поступления воды на поверхность горного бассейна // Труды Гидрометцентра СССР. – 1976. – Вып. 163. – С. 38–57.

4. Мухин В.М., Полунин А.Я. Методические указания к разработке метода краткосрочного прогноза расходов воды горных рек на основе математической модели формирования стока (на примере р. Карадарьи). – М.: Гидрометеоиздат, 1982. – 148 с.

5. Мухин В.М. Применение математического моделирования в сочетании с эмпирическими методами в долгосрочных прогнозах стока горных рек // Труды Гидрометцентра СССР. – 1988. - Вып. 295. – С. 38–49.

6. Мухин В.М., Федорова Ю.В. Эмпирические методы прогноза быстроразвивающихся паводков на некоторых притоках р.Кубани // Труды Гидрометцентра России. – 2006. – № 341. – С. 79–104.

7. Полунин А.Я. О моделировании процесса поступления воды на водосбор для краткосрочных прогнозов стока // Труды Гидрометцентра СССР. – 1988. – Вып. 295. – С. 69–79.

8. Федорова Ю.В. Осадки в бассейне р. Риони // Метеорология и гидрология. – 2000. – № 8. – С. 102–110.

Поступила в редакцию 02.04.2013 г.