

КРАТКОСРОЧНОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СТОКА РЕК ЧЕРНОМОРСКОГО ПОБЕРЕЖЬЯ КАВКАЗА

П.А. Белякова, С.В. Борщ, А.В. Христофоров, Н.М. Юмина

*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации
moshyd@mecom.ru*

Введение

В рамках реализации технического проекта «Система раннего предупреждения об опасных явлениях на территории Северо-Кавказского федерального округа, подсистема гидрологических наблюдений и прогнозирования» отделом речных гидрологических прогнозов Гидрометцентра России для шести речных бассейнов Черноморского побережья Кавказа разработана система методик календарного прогнозирования среднесуточных и максимальных расходов и уровней воды с заблаговременностью одни сутки. В основе этих методик лежит модель формирования талого и дождевого стока, которая учитывает природные особенности рассматриваемого региона и предусматривает использование данных гидрометрических наблюдений в замыкающем створе, данных метеорологических наблюдений на расположенной в пределах водосбора метеостанции и метеорологических прогнозов слоя осадков и средней температуры приземного слоя воздуха. Модель определяет схему расчета расхода воды за следующие после даты составления прогноза сутки. Переход от максимальных расходов к уровням воды осуществляется с помощью уточненных кривых $Q(H)$.

Условия формирования стока и водный режим рек

Исследуемые водосборы расположены на южном склоне Большого Кавказского хребта. В табл. 1 для каждого водосбора помещены его площадь водосбора A , км²; длина реки L , км; средняя высота \bar{z} , км; средний уклон I , %; средний расход воды \bar{Q} , м³/с. Перечисление рек ведется с северо-запада на юго-восток.

Природные условия исследуемой территории подробно рассмотрены в [7, 10, 11]. Бассейны рек обращены в сторону Черного моря. Рельеф в основном горный, сильно расчлененный. По мере приближения к морю рельеф приобретает холмистый характер со слабой расчлененностью. Развит карст, способствующий увеличению доли подземного питания и повышению минимального стока. Субтропические, буковые и каштановые леса покрывают водосборы до высот 1500–1600 м. Выше до высот 1900–2000 м произрастают

темнохвойные леса. Выше до высот 2300–2400 м расположен субальпийский пояс, еще выше – альпийский. Незначительные ледники имеются только в бассейне р. Мзымта.

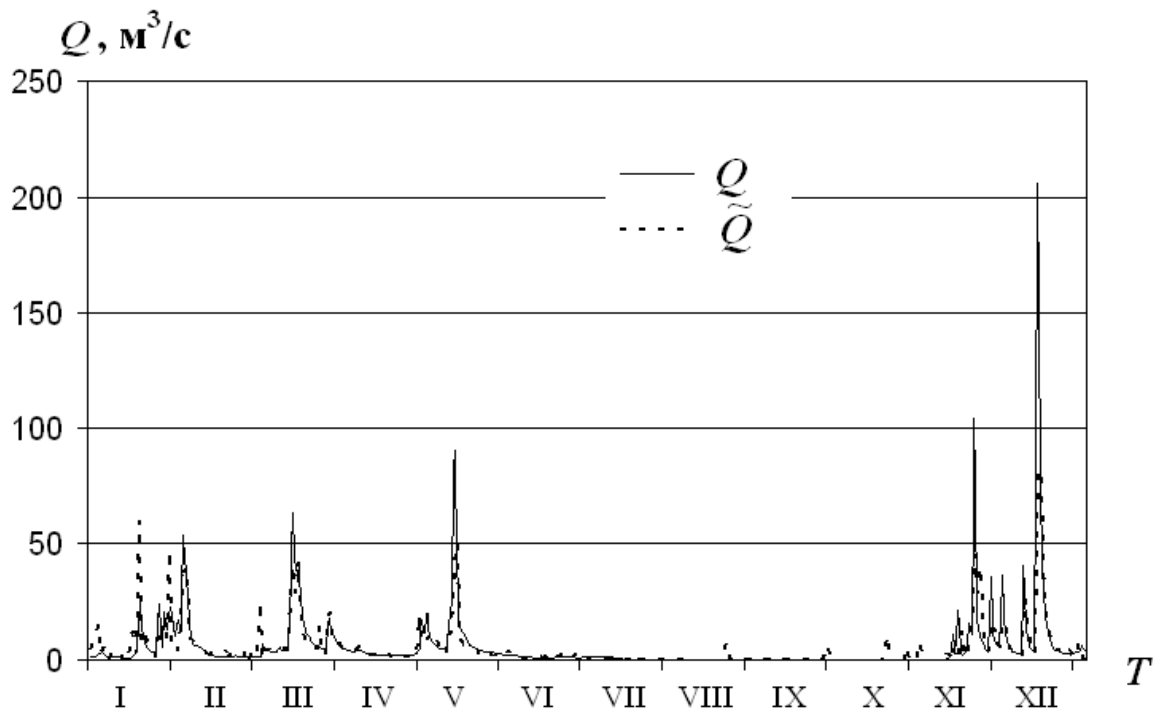
Таблица 1

Основные характеристики исследуемых водосборов

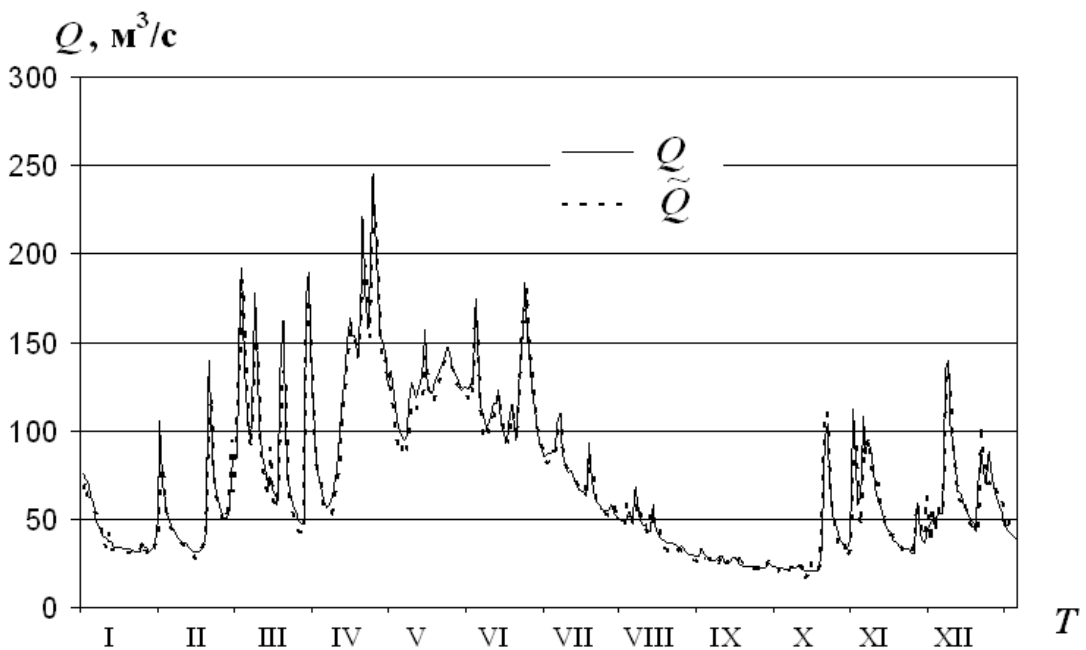
Река	Пост	A , км ²	L , км	\bar{z} , км	I , %	\bar{Q} , м ³ /с.
Вулан	с. Архипо-Осиповка	265	27	240	18	8,8
Туапсе	г. Туапсе	350	29	390	10	13,1
Сочи	с. Пластунка	238	30	840	49	15,4
Сочи	г. Сочи	296	44	720	40	16,5
Мзымта	п. Красная Поляна	510	48	1670	27	33,8
Мзымта	п. Казачий Брод	839	75	1340	24	55,3

Климат достаточно теплый и влажный с повышением температуры и осадков с северо-запада на юго-восток. Благодаря теплому климату ледовые образования на реках развиты слабо, а в нижнем течении вовсе отсутствуют. Характерна высотная поясность со значительными вертикальными градиентами температуры и осадков. Вертикальный градиент температуры может в среднем достигать -2 °С/100 м, а осадков – 150 мм/100 м. Эти градиенты меняются в течение года, достигая максимума зимой и минимума летом. В горах на высотах менее 600–800 м зимой часто наблюдаются оттепели, приводящие к формированию снеговых и смешанных паводков. Внутригодовое распределение осадков достаточно равномерное с максимумом зимой и минимумом весной-летом. Снег может выпадать даже в прибрежных районах. На высотах более 2000 м жидкие осадки выпадают только с апреля по ноябрь. В зависимости от высоты местности и экспозиции склонов суточный слой осадков может достигать 100–300 мм. Неустойчивый снежный покров и бесснежные зимы наблюдаются на высотах до 600–1300 м. Выше, до высот 3200 м, наблюдается переменный снежный покров с продолжительностью залегания более 120 дней. В зависимости от высоты местности интенсивность снеготаяния колеблется от 2,3 до 27,6 мм/сут [10, 11].

Для водного режима рек характерно прохождение паводков в течение всего года. Типичные гидрографы представлены на рис. 1 и 2. Продолжительность подъема паводков 2 суток, спада – 6–8 суток. Преобладает дождевое питание рек. Для р. Вулан оно составляет 89 %. С увеличением высоты водосбора его доля снижается, а доля снегового питания, наоборот, возрастает. Для р. Мзымта оно составляет 39 %. Подземное питание значительно и составляет 15–30 %. Доля ледникового питания незначительна и даже для р. Мзымта составляет 0,1 % [7, 10].



**Рис. 1. Фактический $Q(t)$ и спрогнозированный $\tilde{Q}(t)$ гидрографы
р. Вулан – с. Архипо-Осиповка за 1994 г.**



**Рис. 2. Фактический $Q(t)$ и спрогнозированный $\tilde{Q}(t)$ гидрографы
р. Мзымта – п. Казачий Брод за 2005 г.**

В водном режиме р. Вулан выделяются два периода. В зимний период с ноября по февраль характерны высокие быстро сменяющиеся паводки, вызываемые дождями и таянием

снега в верховьях. В летне-осенний период с июня по октябрь устойчивая межень редко прерывается дождевыми паводками. В створе с. Архипо-Осиповка колебания уровня воды могут достигать 7,6 м.

На р. Туапсе дождевые паводки наблюдаются в течение всего года с максимальной активностью в период с декабря по март. Прерываемая редкими паводками межень наблюдается с мая по октябрь. В нижнем течении раз в 7–10 лет река может пересыхать на срок до 55 дней. В створе г. Туапсе колебания уровня воды могут достигать 5 м.

В бассейне р. Сочи снеговые паводки могут формироваться в январе–феврале во время оттепелей в его верхней части. Практически весь год наблюдаются короткие дождевые паводки. Прерываемая редкими паводками межень наблюдается с июня по сентябрь. Колебания уровня воды могут достигать 2,3 м в створе с. Пластунка и 3,3 м в створе г. Сочи.

На р. Мзымта весенне-летнее половодье с преобладанием талого и тало-дождевого стока начинается в конце марта – начале апреля и длится до начала июля или августа. В самой верхней части водосбора половодье может продолжаться по октябрь. На спаде половодья начинается паводочный период с преобладанием дождевого стока, который длится по декабрь. Короткая зимняя межень длится с января по февраль. Колебания уровня воды могут достигать 1,6 м в створе п. Красная Поляна и 2,8 м в створе п. Казачий Брод [7, 10].

Модель формирования талого и дождевого стока

Основными процессами формирования речного стока являются поступление воды на поверхность водосбора, потери талых и дождевых вод, а также стекание воды по склонам и по русловой сети [12, 15]. При построении модели формирования стока рек Черноморского побережья Кавказа учитывались следующие обстоятельства.

1. На основе теоретических исследований, анализа многочисленных экспериментальных данных и обобщения огромного материала по различным горным регионам мира процессы формирования талого и дождевого стока горных рек достаточно хорошо изучены. Опыт их моделирования и разработки методов краткосрочного прогноза стока горных рек обобщен в работах [9, 12, 15]. В условиях достаточной гидрометеорологической изученности водосборов и при наличии достаточно точных метеорологических прогнозов на период заблаговременности в настоящее время возможно вполне надежное предсказание стока горных рек [3–6, 8].

2. Для каждого водосбора могут использоваться только один гидрометрический пост и одна метеостанция (для р. Вулан – в пределах соседнего водосбора). Регулярные снегомерные

съемки не проводились. Ограниченная репрезентативность возможных предикторов позволяет модели описывать процессы формирования речного стока лишь приближенно.

3. Эти зависимости должны отражать эффект пространственного осреднения характеристик формирования речного стока по водосбору. Необходимо учитывать, что только для линейных зависимостей, полученных для конкретных точек водосбора, их вид сохраняется при пространственном осреднении по всей его территории. Вид прогностических зависимостей должен обеспечивать возможность достаточно простой и надежной статистической оценки их параметров, «просеивания» предикторов, получения оптимального варианта прогностической зависимости, определения ее погрешности и применимости методики прогнозирования в автоматизированном режиме в целях оперативного предупреждения об опасных наводнениях.

4. Ориентация на получение прогноза с помощью полуэмпирической зависимости обусловлено тем, что для исследуемых речных бассейнов время формирования стока сопоставимо с интервалами между сроками гидрологических и метеорологических наблюдений и заблаговременностью прогноза. Это затрудняет традиционное использование модели формирования речного стока как инструмента трансформации известного и прогнозируемого хода метеорологических элементов и уже наблюдаемой водности реки в ожидаемые значения расхода и уровня воды в замыкающем створе.

5. С учетом сроков метеорологических и гидрологических наблюдений процесс формирования речного стока может описываться для расчетного интервала времени продолжительностью 12 часов. Статистический анализ данных наблюдений для всех шести водосборов показал возможность использования в качестве расчетного интервала в одни сутки, что вполне соответствует использованию данных гидрологических ежегодников.

6. Все параметры модели принимаются постоянными в течение не слишком продолжительного расчетного периода времени. С учетом числа лет синхронных наблюдений за уровнями и расходами воды на гидрометрических постах и наблюдений за приземной температурой воздуха и осадками на метеорологических станциях продолжительность такого периода может составлять от недели до месяца. В окончательном варианте рассматривалась половина каждого месяца.

Общие закономерности изменения приземной температуры воздуха, количества атмосферных осадков и величины запасов воды в снежном покрове с высотой местности рассмотрены в [1, 2, 7, 10, 11]. Благодаря малым размерам рассматриваемых водосборов для среднесуточной температуры и в меньшей степени для суточного слоя осадков имеет место

высокая корреляция между их колебаниями в разных точках водосбора. Для расположенных в бассейне р. Мзымта метеостанций Красная Поляна и Лаура коэффициент корреляции между среднесуточными температурами воздуха равен 0,99, а между значениями суточного слоя осадков – 0,95. Для метеостанций Красная Поляна и Ачишхо аналогичные коэффициенты равны 0,92 и 0,86. Для расположенных в бассейне р. Туапсе метеостанций г. Туапсе и п. Горный аналогичные коэффициенты равны 0,98 и 0,77. На этом основании значения приземной температуры воздуха и количества атмосферных осадков на разных высотах описывались в виде линейной функции от высоты местности и значения той же метеорологической характеристики на метеостанции. Для расчетного периода времени (неделя – месяц) предполагалось постоянство вертикального градиента для каждого метеорологического фактора.

Поступление дождевых вод на поверхность речного бассейна происходит ниже изотермы 2 °С [1, 4, 12, 14]. С учетом линейного убывания температуры с высотой для метеостанции определялась минимальная температура $T_{min,P}$, при которой изотерма 2 °С проходит через самую нижнюю точку водосбора и, следовательно, еще не происходит поступления дождевых вод на его поверхность. При пространственном осреднении осадков по территории водосбора, расположенной ниже изотермы 2 °С, учитывались рост слоя осадков с высотой и увеличение с ростом температуры площади части водосбора, на которую поступают дождевые воды. В прогнозах талого стока принято считать, что выпадающие на снег жидкие осадки приравниваются к поступлению воды непосредственно на поверхность бассейна, за исключением той их части, которая может быть удержана снежным покровом [9, 12, 15]. Удержание воды в снеге отдельно учитывалось при расчете поступления талых вод, поэтому средний слой поступления дождевых вод $h_p(t)$ за сутки t определялся для всей площади водосбора ниже изотермы 2 °С. В зависимости от приземной температуры воздуха $T(t)$ и слоя осадков $P(t)$ за сутки t на метеостанции величину $h_p(t)$ предлагается определять по формуле

$$h_p(t) = P(t)[T(t) - T_{min,P}] \cdot [a_p T(t) + b_p], \quad (1)$$

где a_p и b_p – постоянные для каждого расчетного периода параметры модели. Характер зависимости слоя $h_p(t)$ от температуры $T(t)$ объясняется тем, что с ростом температуры изотерма 2 °С поднимается. Следовательно, увеличиваются не только площадь поступления дождевых вод, но и средний для всего водосбора слой осадков. Если на метеостанции температура меньше $T_{min,P}$, то на всем водосборе приземная температура ниже 2 °С и, следовательно, поступление дождевых вод отсутствует. Следовательно, в формуле (1)

значения $T(t) < T_{min,P}$ должны заменяться числом $T_{min,P}$, при этом правая часть формулы (1) обращается в нуль. Влияние температуры $T(t)$ на слоя поступления дождевых вод происходит до достижения ею некоторого максимума T_{max} , при котором практически на всей территории водосбора снежный покров отсутствует и может формироваться дождевой сток. Следовательно, в формуле (1) более высокие значения $T(t) > T_{max}$ должны заменяться числом T_{max} .

Таяние снежного покрова происходит на территории водосбора, покрытой снегом и расположенной ниже нулевой изотермы. При положительной температуре слой стаявшей воды пропорционален ее величине [5, 9, 12, 14]. С учетом линейного убывания температуры с высотой для метеостанции определялась минимальная температура $T_{min,S}$, при которой изотерма 0°C проходит через самую нижнюю точку водосбора и, следовательно, еще не происходит поступления талых вод на его поверхность. Ввиду отсутствия данных снегомерных съемок учитывалась только зависимость слоя поступления талых вод на поверхность водосбора от температуры воздуха на опорной метеостанции без учета пространственной изменчивости запасов воды в снеге в пределах каждого высотного пояса. Средний для каждого высотного пояса запас воды в снежном покрове, учитывающий площадь покрытых снегом участков, описывался в виде линейной функции от высоты местности. В сочетании со средней для каждого высотного пояса температурой воздуха средний запас воды в снеге определял слой стаивания и слой удержания воды в снеге. В зависимости от средней за сутки t приземной температуры воздуха $T(t)$ на опорной метеостанции средний для всего водосбора слой поступления талых вод на его поверхность $h_S(t)$ предлагается определять формулой:

$$h_S(t) = [T(t) - T_{min,S}] \cdot [a_S T(t) + b_S], \quad (2)$$

где a_S и b_S – постоянные для каждого расчетного периода параметры модели. Характер зависимости слоя $h_S(t)$ от температуры $T(t)$ объясняется тем, что температура воздуха определяет не только интенсивность снеготаяния, но и площадь водосбора, на которой оно происходит. С ростом температуры на метеостанции $T(t)$ от $T_{min,S}$ до определенного значения слой поступления талых вод возрастает, а потом убывает до нуля при достижении температуры отсутствия снежного покрова T_{max} . Если на метеостанции температура меньше $T_{min,S}$, то на всем водосборе приземная температура ниже 0°C и, следовательно, поступление талых вод отсутствует. Следовательно, в формуле (2) значения $T(t) < T_{min,S}$ должны заменяться

числом $T_{min,S}$, при этом правая часть формулы (2) обращается в нуль. Если температура на метеостанции $T(t)$ превышает T_{max} , то в формуле (2) ее следует заменять числом T_{max} .

Средний для всего водосбора суммарный слой поступления воды на его поверхность $h(t)$ определяется суммой $h_p(t) + h_s(t)$. Потери склонового стока складываются из потерь на поверхностное задержание, испарение и впитывание воды в почву. Последнее расходуется на восполнение запасов воды в почве, инфильтрацию воды в нижележащие слои грунта и аккумуляцию воды в прирусловой делювиальной осыпи [3–5, 12, 15]. Для горных рек рассматриваемого региона большие уклоны местности снижают роль поверхностного задержания, а быстрое (несколько часов) формирование склонового стока снижает роль испарения даже в теплое время года [5, 7, 11]. Эти потери косвенно учитываются ходом осадков и температуры воздуха. Изменение свойств почвенного, растительного и снежного покрова, процессы замерзания и оттаивания почвы учитываются путем оценки параметров модели для каждого расчетного периода времени. В виду отсутствия данных наблюдений, которые могли бы характеризовать пространственную изменчивость потерь склонового стока, использовались средние для всего водосбора характеристики, приближенно определяемые данными метеостанции и замыкающего створа.

Важнейшей характеристикой потерь является средний индекс увлажнения водосбора $I_w(t)$ к началу суток t . Его предлагается определять путем осреднения уравнения водного баланса слоя почвы по всей территории водосбора и представлять в виде:

$$I_w(t) = \sum_{j=1}^m [h(t-j) - q(t-j)], \quad (3)$$

где $q(t-j)$ – значения слоя склонового стока (мм) за предыдущие сутки при $j = 1, \dots, m$. Смысл такого индекса увлажнения вполне очевиден – он определяется разностью между поступлением воды на поверхность водосбора и суммарным склоновым стоком за предыдущие сутки, число m которых зависит от скорости процессов формирования стока.

На покрытых луговой растительностью склонах быстро и практически без потерь формируется подвешенный поверхностный сток. На участках с толщами моренных отложений и на прилегающих к русловой сети участках также быстро и практически без потерь формируется подповерхностный сток [3, 7, 10]. Исходя из этого выделяется часть бассейна с относительной площадью λ , на которой быстро и практически без потерь формируется приток в русловую сеть со средним для всего водосбора расходом воды $ch(t)$.

Для части водосбора с относительной площадью $1 - \lambda$, занятой буково-каштановыми и пихтовыми лесами, почвы имеют повышенную скважность, что способствуют формированию

контактного внутрпочвенного стока. Возможно провальное поступление воды в почву по жилам и трещинам [4, 7, 10]. Просочившийся в почву слой $i(t)$ расходуется на увеличение запаса почвенной влаги $W(t)$ и формирование внутрпочвенного и грунтового склонового стока. Своего максимального значения $i_{max}(t)$ слой поступления влаги в почву достигает в случае, когда к концу суток запас почвенной влаги достигает максимальной влагоемкости почвы W_{max} . Для величины $i_{max}(t)$ предложена формула:

$$i_{max}(t) = \left(1 + \frac{\beta}{2}\right)W_{max} - \left(1 - \frac{B}{2}\right) \cdot [W_0 + I_W(t)], \quad (4)$$

где W_0 – средний запас почвенной влаги к началу суток $t - m$; B – средняя ширина склона.

При недостаточном слое поступления воды $h(t) < i_{max}(t)$, вся она расходуется на увеличение запаса почвенной влаги. В этом случае поверхностный склоновый сток отсутствует, и слой просочившейся в почву влаги равен слою поступления воды $h(t)$. При избыточном слое поступления воды $h(t) \geq i_{max}(t)$, часть влаги формирует подпертый поверхностный склоновый сток, и слой поступления влаги в почву достигает своего максимального значения $i_{max}(t)$. С учетом этих обстоятельств средний расход склонового стока $\tilde{q}(t)$ для рассматриваемой части бассейна с потерями воды на впитывание предлагается определять с помощью формулы:

$$\tilde{q}(t) = \begin{cases} 2\gamma[W_0 + I_W(t)] + \gamma h(t), & \text{если } h(t) < i_{max}(t) \\ h(t) + W_0 + I_W(t) - W_{max}, & \text{если } h(t) \geq i_{max}(t) \end{cases} \quad (5)$$

Учитывая, что расход $\tilde{q}(t)$ соответствует части водосбора с относительной площадью $1 - \lambda$, а расход $ch(t)$ соответствует части водосбора с относительной площадью λ , получаем формулу для определения среднего для всего бассейна расхода воды склонового стока:

$$q(t) = (1 - \lambda) \cdot \tilde{q}(t) + \lambda ch(t). \quad (6)$$

Для перехода от расходов склонового стока к расходу воды $Q(t)$ в замыкающем створе использован интеграл Дюамеля. При переходе к средним за сутки значениям он трансформируется в выражение:

$$Q(t) = c_0 q(t) + c_1 q(t-1) + c_n q(t-n) + Q_{zp}(t), \quad (7)$$

где $Q_{zp}(t)$ – близкий к константе расход грунтового стока; n – число учитываемых предыдущих суток [6, 8, 9, 12]. Благодаря малым размерам рассматриваемых водосборов и большим уклонам их поверхности время формирования расходов воды в замыкающих створах

происходит достаточно быстро, поэтому число n не велико, а последовательность коэффициентов в формуле (7) – убывающая.

Во избежание неоправданного усложнения модели, значения расходов склонового стока $q(t-1), \dots, q(t-n)$ в формуле (7) целесообразно выразить через наблюдавшиеся расходы воды в замыкающем створе $Q(t-1), Q(t-2), \dots$. Для этого необходимо составить систему уравнений, каждое из которых может быть получено путем замены t в формуле (7) на $t-1, t-2$ и так далее. Решение такой линейной системы приводит к необходимости учета расходов воды в замыкающем створе за все предшествующие сутки. Однако, благодаря быстрому снижению роли этих расходов воды по мере удаления от даты t сроков их прохождения, достаточную точность модели может обеспечить приближенное решение, в котором учитываются только расходы воды за L предшествующих суток. В результате формула (7) трансформируется в выражение:

$$Q(t) = c_0 q(t) + C_1 Q(t-1) + C_L Q(t-L) + d. \quad (8)$$

Расход грунтового стока не играет заметной роли в формировании максимального стока и косвенно учитывается свободным членом d и расходами воды за предшествующие дате t сутки.

При определении входящего в формулу (8) среднего расхода склонового стока $q(t)$ необходим индекс увлажнения водосбора $I_W(t)$ к началу суток t . Используемая для этого формула (3) содержит сумму расходов склонового стока за m предшествующих суток. Как и в предыдущем случае, достаточную точность модели может обеспечить приближенное решение, в котором эти расходы склонового стока выражаются через наблюдавшиеся расходы воды в замыкающем створе за M предшествующих суток. В этом случае индекс увлажнения $I_W(t)$ определяется формулой:

$$I_W(t) = \sum_{j=1}^m h(t-j) - \sum_{j=1}^M b_j Q(t-j). \quad (9)$$

Подстановка этого выражения в формулу (4) определяет максимальный слой поступления влаги в почву $i_{max}(t)$. Полученные таким образом значения $I_W(t)$ и $i_{max}(t)$ должны быть подставлены в формулу (5). В сочетании с формулой (6) она определяет средний расход воды склонового стока $q(t)$, необходимый для определения расхода воды в замыкающем створе $Q(t)$ по формуле (8). Все параметры модели принимаются постоянными для расчетного периода времени от недели до месяца и подлежат оценке на основе данных наблюдений по каждому из рассматриваемых водосборов.

Получение методик прогноза расходов и уровней воды

Для всех указанных выше створов использовались данные гидрометрических наблюдений на соответствующих постах по 2011 г. Год начала наблюдений варьирует от 1928 г. для р. Сочи – с. Пластунка до 1968 г. для р. Мзымта – п. Казачий Брод. В гидрометрических наблюдениях имелись пропуски, поэтому число лет наблюдений варьирует от 35 до 80. Для каждого створа были построены уточненные зависимости $Q(H)$, соответствующие условиям 2011 года. Эти зависимости позволяют получать прогноз уровня воды на основании прогноза расхода воды.

С целью определения возможной заблаговременности прогноза анализировались данные самописца уровней воды на р. Мзымта. Оказалось, что пики снеговых паводков чаще всего проходят в вечерние часы с 19.00 до 21.00. Это связано с задержкой формирования талого стока по сравнению с суточным ходом температур. Формирование пиков дождевых паводков зависит исключительно от характера выпадения атмосферных осадков. В большинстве случаев максимальные уровни и расходы воды дождевых паводков наблюдаются с 10.00 до 21.00. Следовательно, при выпуске прогноза максимальных расходов и уровней воды в 19.00 по местному времени, его заблаговременность, то есть срок до прохождения этих максимумов в течение следующих суток, может варьировать от 14 до 26 часов.

Для каждого из шести водосборов, как уже отмечалось выше, использовались данные одной метеостанции. Для р. Вулан использовалась метеостанция п. Джубга, расположенная на соседнем водосборе, для р. Сочи – в г. Сочи. В бассейнах рек Туапсе и Мзымта имелись по две метеостанции: г. Туапсе и п. Горный для р. Туапсе; п. Красная Поляна и кордон Лаура для р. Мзымта. Для относящихся к одному водосбору пар метеостанций имеет место очень высокая корреляция между данными наблюдений. Данное обстоятельство позволило ограничиться только одной метеостанцией для каждой реки. Таким образом, использовались данные по четырем метеостанциям за период с 1984 по 2011 г. Эти данные включали ежедневные наблюдения за приземной температурой воздуха T и слоем атмосферных осадков P в 6.00 и в 18.00 по местному времени. Число лет n гидрологических и метеорологических наблюдений, использованных при получении методики прогноза для всех шести рассматриваемых речных створов, помещено в табл. 2.

Прогноз ожидаемых значений осадков и температуры воздуха планируется осуществлять с помощью различных метеорологических моделей. Проверка по данным за 2012 г. показала, что они позволяют достаточно точно прогнозировать на сутки вперед приземную температуру воздуха. В то же время достижение достаточной точности прогноза

осадков требует дополнительных исследований. На этом основании использовалось предположение о возможности достаточно точного прогнозирования осадков на одни сутки вперед. Предлагаемая в качестве предварительного результата методика прогнозирования речного стока включает ожидаемые значения температуры и осадков в состав известных на дату составления прогноза предикторов. Таким образом, при прогнозировании расходов и уровней воды на одни сутки вперед в качестве предикторов могли использоваться наблюдавшиеся расходы воды в речном створе, известные на дату составления прогноза t и ожидаемые на следующие сутки значения среднесуточной температуры приземного слоя воздуха и суточного слоя атмосферных осадков на метеостанции.

Таблица 2

Характеристики предлагаемых прогностических зависимостей

Река, створ	n	$T_{min,P}$, °C	$T_{min,S}$, °C	T_{max} , °C	R	σ_{np} , м ³ /с.	$\sigma_{np} / \sigma_{\Delta}$
р. Мзымта – п. К. П.	8	2	0	30	0,95	8,6	0,60
р. Мзымта – п. К. Б.	11	0,5	-2	25	0,95	10,0	0,60
р. Сочи – с. Пласт.	16	3,5	2	27	0,82	8,5	0,64
р. Сочи – г. Сочи	16	2	0	27	0,82	11,9	0,62
р. Туапсе	9	2	0	25	0,86	14,2	0,53
р. Вулан	20	2	0	25	0,78	6,4	0,56

Ожидаемый суточный слой поступления талых и дождевых вод $h(t+1)$ определяется формулами (1) и (2) при подстановке в них результатов прогноза среднесуточной температуры воздуха $T(t+1)$ и суточного слоя осадков $P(t+1)$. Для предшествующих суток этот слой определяется по наблюдавшимся значениям температуры и осадков. Формулы модели позволяют находить индекс увлажнения водосбора $I_w(t+1)$ к началу суток $t+1$, максимальный слой поступления влаги в почву $i_{max}(t+1)$, расход склонового стока $q(t+1)$ и, наконец, прогноз среднесуточного расхода воды в замыкающем створе $Q(t+1)$. Для оборудованных самописцами уровней воды створов на р. Мзымта прогнозировались не только среднесуточные расходы воды Q , но и максимальные за сутки расходы воды Q_{max} .

За исключением формулы (5) все остальные уравнения модели являются линейными относительно входящих в них параметров. Нелинейность формулы (5) исчезает при достаточно большом слое поступления воды на поверхность бассейна $h(t)$, когда он превышает максимальный слой поступления влаги в почву $i_{max}(t)$. Предлагаемая методика

предназначена для прогнозирования опасно высоких паводков, которые формируются именно при больших значениях слоя поступления талого или дождевого стока. Следовательно, применение прогностической зависимости только для случая $h(t) \geq i_{max}(t)$ выглядит вполне оправданным. Однако его правомочность требует тщательной проверки, которая и была выполнена на основе статистического анализа исходных данных наблюдений.

При получении прогностических зависимостей для каждого водосбора проверялись их различные варианты, отличающиеся составом предикторов, критическими значениями температуры, видом формулы получения прогноза $\tilde{Q}(t+1)$ или $\tilde{Q}_{max}(t+1)$, входящими в нее параметрами и продолжительностью периода постоянства этих параметров. Параметры каждого варианта прогностической зависимости оценивались методом наименьших квадратов. Теснота прогностических зависимостей характеризовалась коэффициентом корреляции R между фактическими и прогнозируемыми значениями среднесуточного или максимального расхода. Сравнение различных вариантов прогностических зависимостей осуществлялось с помощью статистических критериев дисперсионного анализа [13]. Выполненный анализ привел к следующим выводам.

1. Расчетный период относительного постоянства условий формирования ее стока составляет половину месяца. Следовательно, оценка параметров прогностической зависимости должна выполняться для половины каждого месяца. При продолжительности базового периода гидрологических и метеорологических наблюдений за n лет для половины каждого месяца параметры оценивались по данным $N = 14n - 16n$ наблюдений.

2. Параметры модели L и M в формулах (8) и (9) равны 1, то есть наблюдавшиеся в замыкающем створе расходы воды должны учитываться за сутки t и $t-1$.

3. Общий вид формулы получения прогноза соответствует предусматриваемому моделью варианту определения расхода склонового стока по формуле (5) при достаточно больших значениях слоя поступления талых и дождевых вод на поверхность водосбора $h(t) \geq i_{max}(t)$.

В целях обоснования последнего весьма ответственного вывода была выполнена серия исследований. Из имеющихся данных N наблюдений в отдельный массив были выделены случаи значительного увеличения максимальных расходов воды, вызванные интенсивным таянием снежного покрова при повышении температуры воздуха. На основе выделенных таким образом данных были получены несколько вариантов прогностических зависимостей. Эти зависимости сравнивались с аналогичными по виду зависимостями, полученными по оставшимся наблюдениям за период половодья. Применяемый в дисперсионном анализе

критерий Фишера показал отсутствие статистически достоверных расхождений между параметрами сравниваемых зависимостей – для всего периода половодья вне зависимости от водности реки и температуры воздуха может применяться одна зависимость. Также в отдельный массив были выделены высокие паводки, вызванные обильными дождями. На основе выделенных таким образом данных были получены несколько вариантов прогностических зависимостей. Эти зависимости сравнивались с аналогичными по виду зависимостями, полученными по оставшимся наблюдениям за паводочный период. И в этом случае критерий Фишера показал отсутствие статистически достоверных расхождений между параметрами сравниваемых зависимостей, следовательно, для всего паводочного периода, вне зависимости от водности реки и слоя выпавших осадков, может применяться одна зависимость.

На основе модели и результатов выполненного анализа вариантов ее реализации предложена единая схема получения прогноза среднесуточных или максимальных расходов воды, отличающаяся для каждого из шести речных створов своими параметрами. Для рек Вулан, Туапсе и двух створов на р. Сочи прогноз на сутки вперед среднесуточного расхода воды $\tilde{Q}(t+1)$ предлагается получать по следующей схеме:

$$\begin{aligned} \tilde{Q}(t+1) = & a_0 + a_1 Q(t) + a_2 Q(t-1) + a_3 [T(t+1) - T_{min,S}]^2 + a_4 [T(t+1) - T_{min,S}] + \\ & + a_5 P(t+1) [T(t+1) - T_{min,P}]^2 + a_6 P(t+1) [T(t+1) - T_{min,P}] + a_7 P(t+1) + a_8 [T(t) - T_{min,S}]^2 + \\ & a_9 [T(t) - T_{min,S}] + a_{10} P(t) [T(t) - T_{min,P}]^2 + a_{11} P(t) [T(t) - T_{min,P}] + a_{12} P(t). \end{aligned} \quad (10)$$

Значения $T(t+1)$ и $T(t)$, превышающие T_{max} , должны заменяться числом T_{max} .

Если значения $T(t+1)$ или $T(t)$ оказываются меньше $T_{min,S}$, их следует заменять числом $T_{min,S}$ (отсутствие поступления талых вод).

Если значения $T(t+1)$ или $T(t)$ оказываются меньше $T_{min,P}$, в формуле (10) значения $P(t+1)$ или $P(t)$ следует заменять нулем (отсутствие поступления дождевых вод).

Для оборудованных самописцами уровней воды створов на р. Мзымта прогноз максимального расхода воды $\tilde{Q}_{max}(t+1)$ можно получать по аналогичной схеме с формулой (10), заменив значения $\tilde{Q}(t+1)$, $\tilde{Q}(t)$ и $\tilde{Q}(t-1)$ на $\tilde{Q}_{max}(t+1)$, $\tilde{Q}_{max}(t)$ и $\tilde{Q}_{max}(t-1)$ соответственно.

Схема получения прогноза полностью соответствует уравнениям модели при $L = M = 1$ и позволяет косвенно учитывать потери речного стока на поверхностное задержание и испарение.

Параметры формулы (10) определяются для половины каждого месяца. Для каждого водосбора критические значения приземной температуры воздуха $T_{min,S}$, $T_{min,P}$ и T_{max} принимаются постоянными в течение всего года. Если метеостанция расположена в самой нижней части водосбора, то определяющая возможность снеготаяния температура $T_{min,S}$ равна 0 °С, а определяющая возможность выпадения жидких осадков $T_{min,P}$ равна 2 °С. Верхний предел T_{max} учитываемой температуры варьирует от 25 °С для более низких водосборов до 30 °С для водосбора р. Мзымта – п. Красная Поляна с максимальной высотой водосбора (табл. 2).

Число параметров формулы (10) довольно велико при длине использованного для их оценки ряда наблюдений $N = 112–320$. Однако точность статистической оценки отдельных параметров и всей прогностической зависимости в целом зависит не только от числа наблюдений, но и от множественного коэффициента корреляции R [13]. Значения R , помещенные в табл. 2 достаточно велики, что и обеспечило достаточно высокую точность определения параметров прогностической зависимости.

Оценка погрешности и эффективности предлагаемых методик прогноза

В соответствие с принятыми требованиями погрешность прогноза характеризовалась средней квадратической погрешностью σ_{np} его ошибки. В практике гидрологических прогнозов для оценки σ_{np} применяется проверка на «независимом» материале [12, 13]. С целью такой проверки при оценке параметров прогностических зависимостей из ряда наблюдений исключались данные за один год. Данные за этот год использовались для сравнения прогноза расходов воды с их фактическими значениями. Эта процедура производилась для всех n лет базового периода, на основании чего оценивалась погрешность прогноза σ_{np} . На рис. 1 и 2 приведены совмещенные графики колебаний фактических и спрогнозированных расходов воды для двух речных створов. Для остальных водосборов также имеет место достаточно хорошее совпадение фактических и спрогнозированных расходов воды в течение всего года.

Для оценки погрешности прогноза σ_{np} также использовалась теоретическая формула, которая учитывает не только разности между фактическими и прогнозируемыми расходами воды, но и соотношение между длиной использованного ряда наблюдений N и числом оцениваемых параметров k [13]. Формула получения такой оценки имеет вид:

$$\sigma_{np} = \sqrt{\frac{N-1}{(N-k)(N-k-1)} \cdot \sum_{j=1}^N (\tilde{Q}_j - Q_j)^2}, \quad (11)$$

где Q_j – фактическое, а \tilde{Q}_j – прогнозируемое значение среднесуточного расхода воды; k – число оцениваемых параметров прогностической зависимости ($k = 13$); N – число совместных наблюдений за максимальным расходом воды и его предикторами за n лет. Для р. Мзымта в формулу (11) подставлялись фактическое $Q_{max,j}$ и прогнозируемое $\tilde{Q}_{max,j}$ значения максимального расхода воды. Оба варианта оценки погрешности прогноза дали близкие результаты.

Эффективность прогноза определяется соотношением $\sigma_{np} / \sigma_{\Delta}$. Величина σ_{Δ} характеризует погрешность инерционного прогноза, когда $Q(t+1)$ или $Q_{max}(t+1)$ прогнозируется, как $Q(t)$ или $Q_{max}(t)$ [12]. Для всех рассматриваемых речных створов в табл. 2 помещены значения множественного коэффициента корреляции для предлагаемых прогностических зависимостей R , их погрешности σ_{np} и показателя эффективности прогноза $\sigma_{np} / \sigma_{\Delta}$.

Помещенные в табл. 2 данные свидетельствуют, что предлагаемая методика краткосрочного прогноза максимальных расходов воды достаточно надежна и эффективна для всех рассматриваемых бассейнов рек Черноморского побережья Кавказа. Наличие для каждого речного створа достаточно надежных зависимостей $Q(H)$ позволяет достаточно точно прогнозировать на сутки вперед и уровни воды.

Заключение

Предлагаемая модель формирования талого и дождевого стока определяет общую схему прогнозирования расходов воды в замыкающем створе на основе учета природных особенностей региона и специфики располагаемой гидрометеорологической информации при наличии одного гидрометрического поста в замыкающем створе и одной метеостанции в пределах водосбора.

Методики прогнозирования среднесуточных и максимальных расходов воды с заблаговременностью одни сутки учитывают текущую водность реки и метеорологические условия и предусматривают возможность использования прогнозов приземной температуры воздуха и осадков.

Прогнозирование среднесуточных и максимальных уровней осуществляется на основе их зависимостей от соответствующих расходов воды.

Оценка погрешности методик и их проверка на независимом материале показали их достаточно высокую точность и эффективность.

Предлагаемые методики календарного прогнозирования среднесуточных и максимальных расходов и уровней воды могут применяться в автоматизированном режиме и использоваться для оперативного предупреждения об опасных наводнениях на реках Черноморского побережья Кавказа.

Список используемых источников

1. *Алибегова Ж.Д., Элизбарашвили Э.Ш.* Статистическая структура атмосферных осадков в горных районах (на примере Закавказья). – Л.: Гидрометеиздат, 1980. – 136 с.
2. *Барри Р.Г.* Погода и климат в горах. – Л.: Гидрометеиздат, 1984 – 312 с.
3. *Бефани А.Н.* Основы теории ливневого стока // Труды ОГМИ. – 1958. – Ч.2. – Вып. 14. – 387 с.
4. *Бефани Н.Ф.* Прогнозирование дождевых паводков на основе территориально общих зависимостей. – Л.: Гидрометеиздат, 1977. – 181 с.
5. *Комаров В.Д., Мухин В.М., Полуниин А.Я.* Модель формирования снежного покрова и поступления воды на поверхность горного бассейна // Труды Гидрометцентра СССР. – 1976. – Вып. 163. – С. 38–57.
6. *Кучмент Л.С., Демидов В.Н., Мотовилов Ю.Г.* Формирование речного стока. – Л.: Гидрометеиздат, 1983. – 216 с.
7. *Лурье П.М.* Водные ресурсы и водный баланс Кавказа. – СПб.: Гидрометеиздат, 2002. – 506 с.
8. *Музылев Е.Л.* Моделирование стока горных рек и спутниковая информация. – М.: Наука, 1987 – 136 с.
9. *Мухин В.М., Полуниин А.Я.* Методические указания по разработке метода краткосрочного прогноза расходов воды горных рек на основе математической модели формирования стока (на примере р. Карадарьи). – М.: Гидрометеиздат, 1982 – 149 с.
10. *Панов В.Д., Базелюк А.А., Лурье П.М.* Реки Черноморского побережья Кавказа: гидрография и режим стока. – Ростов-на-Дону: Донской издательский дом, 2012. – 605 с.
11. *Погорелов А.В.* Снежный покров Большого Кавказа: Опыт пространственно-временного анализа. – М.: ИКЦ Академкнига, 2002. – 287 с.
12. *Руководство по гидрологическим прогнозам.* Вып. 2. Краткосрочный прогноз расхода и уровня воды на реках. – Л.: Гидрометеиздат, 1989. – 245 с.
13. *Христофоров А.В.* Надежность расчетов речного стока. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1993. – 166 с.
14. *Dingman S.L.* Physical Hydrology. – New York: Macmillan Publishing Company, 1993. – 575 p.
15. *Guide to Hydrological Practices.* Volume I. Hydrology – From Measurement to Hydrological Information // World Meteorological Organization. – No. 168, Geneva, 2009. – 738 p.

Поступила в редакцию 13.06.2013 г.