

## ПРОГНОЗ МАКСИМАЛЬНОГО СТОКА РЕК ЧЕРНОМОРСКОГО ПОБЕРЕЖЬЯ КАВКАЗА

© 2013 г. П.А. Белякова<sup>1,2</sup>, С.В. Борщ<sup>1</sup>, А.В. Христофоров<sup>1,2</sup>,  
Н.М. Юмина<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Федеральное государственное бюджетное учреждение «Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации», Москва

<sup>2</sup> Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Москва

**Ключевые слова:** краткосрочное прогнозирование паводков; региональная модель формирования талого и дождевого стока; вероятность превышения критических расходов и уровней воды на реках.

В целях предупреждения об опасных наводнениях на реках Черноморского побережья Кавказа разработана система методик прогнозирования максимального стока рек Мзымта, Сочи, Западный Дагомыс, Куапсе, Туапсе и Вулан. На основе региональной модели формирования талого и дождевого стока разработана методика достаточно точного и эффективного прогнозирования максимальных расходов и уровней воды с заблаговременностью одни сутки. Предложена схема расчета суточного слоя осадков на метеостанциях, при выпадении которых в течение ожидаемых суток критические значения расходов и уровней воды могут быть превышены с заданной вероятностью. Разработаны методики определения вероятности опасных наводнений в течение следующих суток и пяти суток в зависимости от располагаемой на дату составления прогноза гидрометеорологической информации. Предлагаемые методики могут применяться в автоматизированном режиме и использоваться для оперативного предупреждения об опасных наводнениях на реках Черноморского побережья Кавказа.

### Введение

Для максимально раннего предупреждения об опасных наводнениях на реках Черноморского побережья Кавказа разработана система методик прогнозирования расходов и уровней воды в восьми створах на шести реках данного региона. Для соответствующих водосборов в табл. 1 приведены значения их площади  $A$ , длины реки  $L$ , средней высоты водосбора  $\bar{z}$ , среднего уклона реки  $I$  и среднего многолетнего расхода воды  $\bar{Q}$ .

Природные условия водосборов подробно рассмотрены в [1]. Исследуемые водосборы имеют горный, сильно расчлененный рельеф с большими уклонами. Климат достаточно теплый и влажный. Характерна высотная поясность со значительными вертикальными градиентами температуры и осадков. Снег может выпадать даже в прибрежных районах. На высотах

Таблица 1. Основные характеристики исследуемых водосборов

Река – пост	A, км <sup>2</sup>	L, км	$\bar{z}$ , м	I, %	$\bar{Q}$ , м <sup>3</sup> /с
р. Вулан – с. Архипо-Осиповка	265	27	240	18	8,8
р. Туапсе – г. Туапсе	350	29	90	10	13,1
р. Куапсе – с. Мамедова Щель	14	6,2	380	56	0,72
р. Зап. Дагомыс – пос. Дагомыс	48	20	365	34	2,44
р. Сочи – с. Пластунка	238	30	840	49	15,4
р. Сочи – г. Сочи	296	44	720	40	16,5
р. Мзымта – пос. Красная Поляна	510	48	1670	27	33,8
р. Мзымта – пос. Казачий Брод	839	75	1340	24	55,3

менее 600–800 м зимой часто наблюдаются оттепели, приводящие к формированию снеговых и смешанных паводков. Питание рек преимущественно дождевое и может достигать 90 % для р. Вулан. С увеличением высоты водосбора его доля снижается, а доля снегового питания, наоборот, возрастает и может достигать 40 % для р. Мзымты. Подземное питание значительно и составляет 15–30 %. Ледниковое питание практически отсутствует. Весенне-летнее половодье характерно только для наиболее высокогорных рек Мзымта и Сочи. Дождевые и тало-дождевые паводки наблюдаются в течение всего года, придают гидрографу гребенчатый вид и в отдельные годы могут приводить к опасным наводнениям [1].

#### Краткие сведения об используемой модели формирования талого и дождевого стока

В качестве основы предлагаемых методик прогнозирования опасных наводнений на реках Черноморского побережья Кавказа разработана региональная модель формирования речного стока. В ней отражены современный опыт моделирования процессов формирования и прогнозирования стока горных рек, природные условия рассматриваемых водосборов и специфика гидрометеорологической информации. Благодаря малым размерам водосборов и большим уклонам их поверхности время формирования стока и особенно высоких паводков часто происходит в течение суток. Процессы формирования стока рассматриваемых рек моделировались с шагом в одни сутки. Если отбросить обусловленные ограниченностью исходной гидрометеорологической информации вынужденные упрощения, по существу все блоки модели соответствуют аналогичным блокам моделей формирования стока горных рек, подробно изложенных в [2–5] и нашедших отражение в действующем Руководстве по гидрологическим прогнозам [6].

Средний слой поступления дождевых вод на поверхность водосбора определяли в зависимости от суточного слоя осадков и среднесуточной температуры приземного слоя воздуха на метеостанции. Учитывали, что от температуры воздуха зависят потери на испарение, площадь и средняя высота части водосбора, на которой происходит поступление дождевых вод, а следовательно, при больших вертикальных градиентах осадков и их средний для этой части водосбора слой. Подбирали минимальную температуру  $T_{\min,P}$ , при которой изотерма  $2\text{ }^{\circ}\text{C}$  проходит через самую нижнюю точку водосбора и, следовательно, еще не происходит поступления дождевых вод на его поверхность. В зависимости от перепада высот водосбора и расположения метеостанции значение  $T_{\min,P}$  может варьировать от  $0,5$  до  $3,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Ввиду отсутствия информации о состоянии снежного покрова средний слой поступления талых вод на поверхность водосбора косвенно характеризовался только среднесуточной температурой приземного слоя воздуха, от которой зависит интенсивность снеготаяния и площадь водосбора [6]. Для каждого водосбора подбирали минимальную температуру  $T_{\min,S}$ , при которой изотерма  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  проходит через самую нижнюю точку водосбора и, следовательно, еще не происходит поступления талых вод на его поверхность. В зависимости от перепада высот водосбора и расположения метеостанции значение  $T_{\min,S}$  может варьировать от  $-2$  до  $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Подбирали и максимальную температуру  $T_{\max}$ , при которой практически на всей территории водосбора снежный покров отсутствует и может формироваться только дождевой сток. Ее значение варьирует от  $25$  до  $27\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

При описании процессов формирования склонового стока учитывали, что для рек рассматриваемого региона потери на поверхностное задержание и испарение незначительны. На участках с луговой растительностью и толщами моренных отложений быстро и практически без потерь формируется поверхностный и подповерхностный склоновый сток. На оставшейся части водосбора происходят потери на пополнение запасов почвенной влаги [4, 6, 7]. При оценке этих потерь рассчитывали средний индекс увлажнения водосбора, равный разности между суммарным поступлением талых и дождевых вод на поверхность водосбора и объемом склонового стока за предшествующие сутки. Средний расход склонового стока определяли в зависимости от соотношения между слоем поступления воды на поверхность водосбора и максимально возможным слоем поступления влаги в почву при заданном индексе увлажнения водосбора.

При описании трансформации склонового и руслового стока использовали шаг в одни сутки. Необходимые для расчета индекса увлажнения

водосбора расходы склонового стока выражались через расходы воды в замыкающем створе за те же и предшествующие сутки. Расход воды в замыкающем створе определяли в зависимости от текущего среднего по всему водосбору расхода склонового стока и расходов воды в замыкающем створе за предшествующие сутки.

### **Методика прогнозирования максимальных расходов и уровней воды с заблаговременностью одни сутки**

Методика разработана на основе изложенной выше модели с использованием данных ежедневных гидрологических и метеорологических наблюдений (гидрологические данные – с начала наблюдений на постах, метеоданные – с 1984 по 2012 г.). В окончательном варианте учитывали данные четырех метеостанций: пос. Джубга – для р. Вулан; г. Туапсе – для р. Туапсе; г. Сочи – для рек Западный Дагомыс и Сочи; пос. Красная Поляна – для р. Мзымта. Для р. Куапсе использовали средние арифметические значения данных метеостанций в городах Туапсе и Сочи. Данные других метеостанций не учитывались в связи с их высокой корреляцией с данными четырех основных метеостанций. Число лет гидрологических наблюдений варьирует от 35 до 80. Число лет  $n$  совместных гидрологических и метеорологических наблюдений варьирует от 8 до 20.

В качестве предикторов приняты наблюдавшиеся расходы воды в речном створе, известные на дату составления прогноза и ожидаемые на следующие сутки значения среднесуточной температуры приземного слоя воздуха и суточного слоя атмосферных осадков на метеостанции. Перспективы совершенствования используемых в ФГБУ «Гидрометцентр России» метеорологических моделей позволили исходить из возможности достаточно точного прогнозирования температуры воздуха и осадков на одни сутки вперед для всех четырех используемых метеостанций.

Для оборудованных самописцами створов на р. Мзымта задачу прогнозирования максимального расхода воды с заблаговременностью одни сутки решали непосредственно. Для остальных шести створов предварительно решали задачу прогнозирования среднесуточного расхода воды. В обоих случаях анализировали десятки вариантов реализации уравнений модели, отличающихся составом предикторов, видом формулы получения прогноза и входящими в нее параметрами. Сравнение вариантов осуществляли на основе оценок их погрешности прогноза. В результате была получена единая оптимальная схема прогнозирования среднесуточных или максимальных расходов воды.

Для оборудованных самописцами створов на р. Мзымта для получения прогноза максимального расхода воды на сутки  $t+1$  в качестве предикто-

ров учитывали: максимальный расход воды  $Q_{\max}(t)$  за сутки составления прогноза; максимальный расход воды  $Q_{\max}(t-1)$  за предшествующие сутки; слой осадков на метеостанции  $P(t)$  за сутки составления прогноза; среднюю приземную температуру воздуха на метеостанции  $T(t)$ ; прогноз суточного слоя осадков  $P(t+1)$  на метеостанции; прогноз среднесуточной приземной температуры воздуха  $T(t+1)$ .

Прогноз среднесуточного расхода воды предложено получать по формуле

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

Применение формулы предполагает соблюдение следующих правил:

а) значения  $T(t+1)$  и  $T(t)$ , превышающие  $T_{\max}$ , должны заменяться числом  $T_{\max}$ ;

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

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

Для остальных шести необорудованных самописцами речных створов прогноз среднесуточного расхода  $\tilde{Q}(t+1)$  получаем по аналогичной схеме с заменой величин  $\tilde{Q}_{\max}(t+1)$ ,  $Q_{\max}(t)$  и  $Q_{\max}(t-1)$  величинами  $\tilde{Q}(t+1)$ ,  $Q(t)$  и  $Q(t-1)$  соответственно. Прогноз ожидаемого на следующие сутки максимального расхода воды предложено находить в виде  $\tilde{Q}_{\max}(t+1) = k \tilde{Q}(t+1)$ , где  $k$  – рассчитанное для каждого месяца среднее многолетнее отношение месячных максимумов к соответствующим среднесуточным расходам воды.

Параметры формулы (1) косвенно учитывают характеристики процессов формирования речного стока. Оценка этих параметров выполняли методом наименьших квадратов для каждого месяца на основе соответствующих ему данных многолетних гидрологических и метеорологических наблюдений. При получении прогноза максимальных уровней воды использовали кривую расходов  $Q(H)$ , уточненную для условий 2012 г.

Погрешность методики прогноза среднесуточных и максимальных расходов воды оценивали на независимом материале [8]. Исключали данные за один год, проводили переоценку параметров, а данные за исключенный год использовали для сравнения прогноза расходов воды с их фактическими значениями. Эту процедуру проводили для всех лет базового периода. На рис. 1 приведены совмещенные графики колебаний фактических и спрогнозированных максимальных расходов воды в створе р. Мзымта – пос. Красная Поляна в 2002 г.

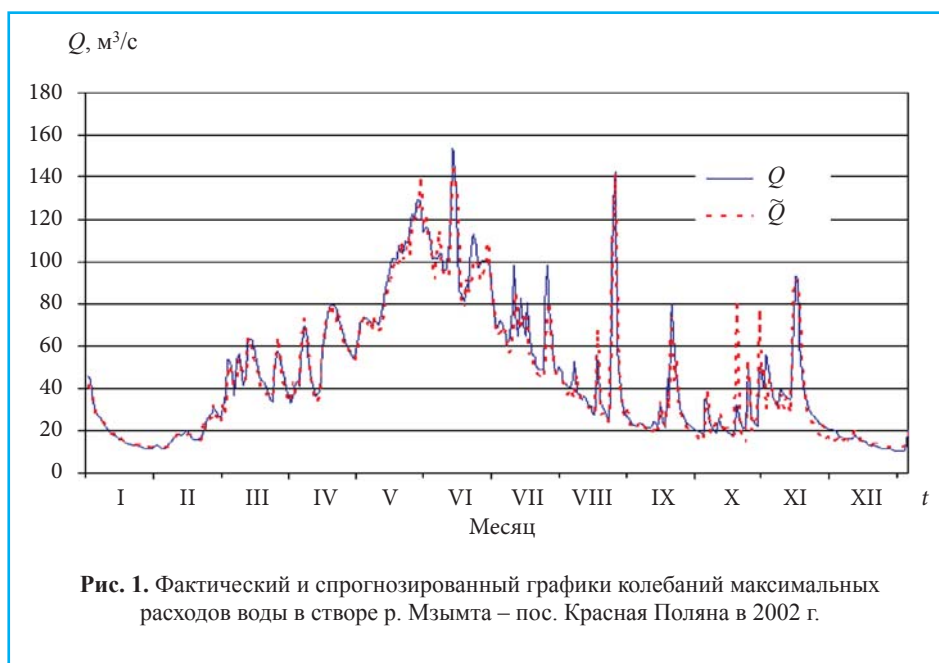
Для оценки погрешности прогноза  $\sigma_{\text{пр}}$  также использовали теоретическую формулу, которая учитывает не только разности между фактическими и прогнозируемыми расходами воды, но и соотношение между длиной использованного ряда наблюдений  $N$  и числом оцениваемых параметров  $K$ . Формула получения такой оценки имеет вид

$$\sigma_{\text{пр}} = \sqrt{\frac{N-1}{(N-K)(N-K-1)} \sum_{j=1}^N (\tilde{Q}_j - Q_j)^2}, \quad (2)$$

где  $Q_j$  и  $\tilde{Q}_j$  – фактическое и прогнозируемое значения среднесуточного расхода воды соответственно;

$K$  – число оцениваемых параметров прогностической зависимости ( $K=13$ );

$N$  – число наблюдений, использованных для их оценки [9].



В зависимости от числа лет использованных гидрологических и метеорологических наблюдений для разных месяцев и речных створов число  $N$  варьировало от 225 до 620. При такой проверке точности предлагаемой методики прогноза показатель  $\sigma_{\text{пр}}$  уже не будет снижаться по мере увеличения числа оцениваемых параметров. Предусмотренное в методике число оцениваемых параметров  $K = 13$  является оптимальным. Проверка показала, что при других вариантах формулы выпуска прогноза и, в частности, при других значениях  $K$  погрешность прогноза  $\sigma_{\text{пр}}$  возрастает.

Эффективность прогноза определяли соотношением  $\sigma_{\text{пр}}/\sigma_{\Delta}$ , где  $\sigma_{\Delta}$  характеризует погрешность инерционного прогноза [8]. В табл. 2 приведены значения множественного коэффициента корреляции для предлагаемых прогностических зависимостей  $R$ , их погрешности  $\sigma_{\text{пр}}$  и показателя эффективности прогноза  $\sigma_{\text{пр}}/\sigma_{\Delta}$ , а также число лет базового периода  $n$  и общее количество использованных синхронных гидрологических и метеорологических наблюдений, равное сумме  $\sum_{i=1}^{24} N_i$  всех дней наблюдений для каждого месяца за  $n$  лет.

Представленные в таблице данные свидетельствуют, что предлагаемая схема получения прогноза расходов воды с заблаговременностью одни сутки достаточно надежна и эффективна для всех рассматриваемых рек Черноморского побережья Кавказа. Наличие для каждого речного створа достаточно надежных зависимостей  $Q(H)$  позволяет достаточно точно прогнозировать на сутки вперед и уровни воды.

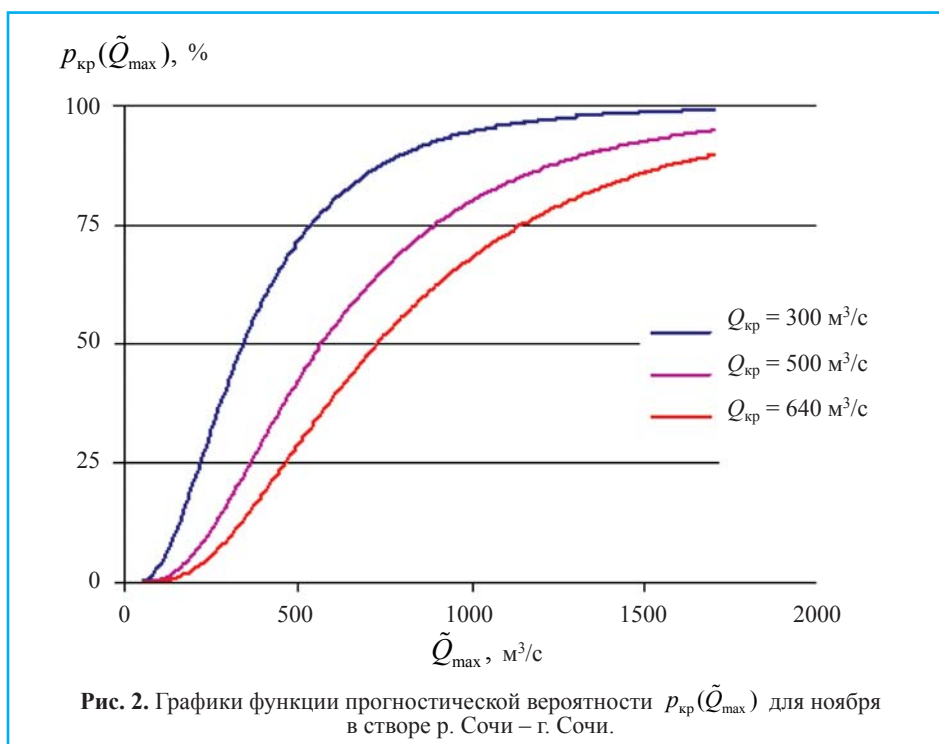
Таблица 2. Характеристики предлагаемых прогностических зависимостей

Река – створ	$n$	$\sum_{i=1}^{24} N_i$	$R$	$\sigma_{\text{пр}}, \text{ м}^3/\text{с}$	$\sigma_{\text{пр}}/\sigma_{\Delta}$
р. Вулан – с. Архипо-Осиповка	20	7238	0,78	6,4	0,56
р. Туапсе – г. Туапсе	9	3189	0,86	14,2	0,53
р. Куапсе – с. Мамедова Щель	19	6691	0,80	0,85	0,62
р. Западный Дагомыс – пос. Дагомыс	17	6204	0,76	3,3	0,59
р. Сочи – с. Пластунка	17	6020	0,82	8,6	0,65
р. Сочи – г. Сочи	18	6506	0,81	12,0	0,62
р. Мзымта – пос. Красная Поляна	8	2761	0,95	8,6	0,60
р. Мзымта – пос. Казачий Брод	11	4012	0,92	15,3	0,60

### Методика вероятностного прогнозирования наводнений с заблаговременностью одни сутки

Для каждого речного створа были заданы критические значения уровней и расходов воды, соответствующие различным уровням опасности наводнений. Вероятностное прогнозирование наводнений с заблаговременностью одни сутки состоит в определении вероятности превышения критических уровней  $H_{кр}$  и расходов воды  $Q_{кр}$  в течение следующих суток  $t+1$  в зависимости от уже полученного прогноза максимального расхода воды  $\tilde{Q}_{max}(t+1)$ . При отсутствии самописцев неизвестный максимальный расход воды выражается через среднесуточный расход в виде  $Q_{max}(t+1) = \bar{k} Q(t+1)$ .

Методика получения таких прогностических вероятностей основана на результатах статистического анализа ошибок прогноза. Установлено, что для всех речных створов ошибка прогноза логарифма максимального расхода воды  $\ln[Q_{max}(t+1)] - \ln[\tilde{Q}_{max}(t+1)]$  практически не зависит от величины  $\tilde{Q}_{max}(t+1)$ . В пределах каждого месяца колебания этой величины можно считать стационарными и подчиняющимися нормальному распределению





вероятностей с математическим ожиданием  $m_{\ln \varepsilon}$  и средним квадратическим отклонением  $\sigma_{\ln \varepsilon}$ . Эти параметры оценивали с учетом автокорреляции используемых рядов и соотношения между их продолжительностью и числом параметров формулы получения прогноза [9, 10].

В зависимости от полученного прогноза максимального расхода воды на следующие сутки  $\tilde{Q}_{\max}$  вероятность превышения критических расходов и уровней воды в течение этих суток предлагается находить по формуле

$$p_{\text{кр}}(\tilde{Q}_{\max}) = 1 - \Phi\left(\frac{\ln Q_{\text{кр}} - \ln \tilde{Q}_{\max} - m_{\ln \varepsilon}}{\sigma_{\ln \varepsilon}}\right), \quad (3)$$

где  $\Phi(x)$  – функция Лапласа нормального распределения вероятностей с нулевым математическим ожиданием и единичной дисперсией.

На рис. 2 для створа р. Сочи – г. Сочи приведены графики функции прогностической вероятности  $p_{\text{кр}}(\tilde{Q}_{\max})$  в ноябре – наиболее опасном месяце с точки зрения наводнений.

#### Методика расчета критического значения суточного слоя осадков на метеостанции

В соответствие с описанной выше схемой прогноз максимального расхода воды на следующие сутки выражается через ожидаемый в течение этих суток на метеостанции слой осадков  $P(t+1)$  в виде  $Q_{\max}(t+1) = \bar{k}A(t+1)P(t+1) + \bar{k}B(t+1)$ , где

$$A(t+1) = a_5[T(t+1) - T_{\min,P}]^2 + a_6[T(t+1) - T_{\min,P}] + a_7; \quad (4)$$

$$B(t+1) = a_0 + a_1Q_{\max}(t) + a_2Q_{\max}(t-1) + a_3[T(t+1) - T_{\min,S}]^2 + a_4[T(t+1) - T_{\min,S}] + a_8[T(t) - T_{\min,S}]^2 + a_9[T(t) - T_{\min,S}] + a_{10}P(t)[T(t) - T_{\min,P}]^2 + a_{11}P(t)[T(t) - T_{\min,P}] + a_{12}P(t). \quad (5)$$

С учетом практически безошибочного прогнозирования температуры  $T(t+1)$  величины  $A(t+1)$  и  $B(t+1)$  можно считать известными на дату составления прогноза  $t$ . Принимая во внимание выражение (3), ожидаемый в течение суток  $t+1$  на метеостанции критический слой осадков  $\tilde{P}_{\text{кр}}(q)$ , при

**Таблица 3.** Среднемесячные значения критического слоя осадков (мм) обеспеченностью 5 % для створа р. Мзымта – пос. Красная Поляна

Месяц	$Q_{кр} = 150 \text{ м}^3/\text{с}$	$Q_{кр} = 255 \text{ м}^3/\text{с}$	$Q_{кр} = 355 \text{ м}^3/\text{с}$
Февраль	434	781	1112
Май	59	180	296
Ноябрь	98	196	289

котором превышение критических расходов и уровней воды может произойти с заданной вероятностью  $q$ , определяется формулой

$$\tilde{P}_{кр}(q) = \frac{Q_{кр} \exp(-m_{\ln \varepsilon} - X_q \sigma_{\ln \varepsilon}) - \bar{k}B(t+1)}{\bar{k}A(t+1)}, \quad (6)$$

где  $X_q$  – квантиль нормального распределения, соответствующий вероятности его превышения  $q$ .

Для оборудованных самописцами створов на р. Мзымта прогноз максимальных расходов воды выводят по формуле (1), поэтому значение коэффициента  $\bar{k}$  в формуле (5) следует заменять единицей. В табл. 3 для створа р. Мзымта – пос. Красная Поляна приведены среднемесячные значения критического суточного слоя осадков  $\tilde{P}_{кр}(5)$  на метеостанции пос. Красная Поляна в феврале (зимняя межень), мае (половодье) и ноябре (сезон дождевых паводков), соответствующие обеспеченности  $q = 5\%$ . Эти данные показывают, что в условиях зимней межени (февраль) критические значения расхода воды практически недостижимы. В период тало-дождевого половодья (май) и в период прохождения дождевых паводков (ноябрь) с вероятностью 5 % первые два критических значения расходов воды  $Q_{кр}$  могут быть превышены при не слишком большом суточном слое осадков  $\tilde{P}_{кр}(5\%)$ .

#### Методика вероятностного прогнозирования наводнений с заблаговременностью пять суток

Прогнозирование наводнений с заблаговременностью пять суток состоит в определении вероятности превышения критических уровней  $H_{кр}$  и расходов  $Q_{кр}$  в течение следующих пяти суток  $t+1, \dots, t+5$  в зависимости от известного на дату составления прогноза максимального расхода воды  $Q_{\max}(t)$  или его оценки  $\bar{k}Q(t)$  при отсутствии самописцев.

Методика получения таких прогностических вероятностей основана на результатах статистического анализа амплитуды  $\Delta_6(t)$  колебания максимальных расходов или их оценок в течение шести суток  $t, t+1, \dots, t+5$ .

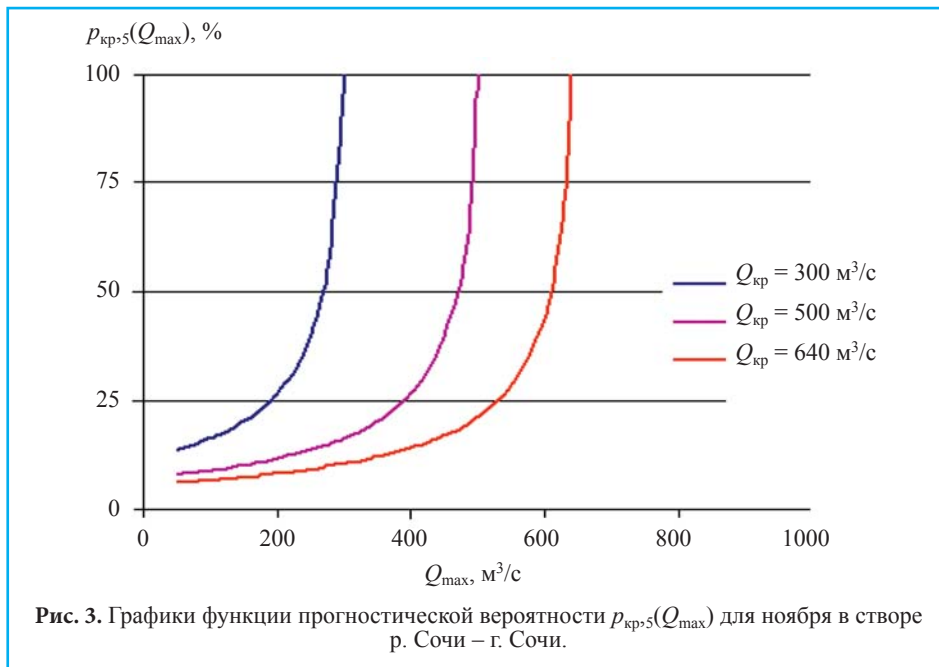
Установлено, что для всех речных створов при прохождении высоких паводков амплитуда  $\Delta_6(t)$  практически не зависит от величины  $Q_{\max}(t)$ . В пределах каждого месяца колебания этой величины можно считать стационарными и подчиняющимися логарифмически нормальному распределению вероятностей, т. е. величину  $\ln[\Delta_6(t)]$  можно считать нормальной случайной величиной с параметрами  $m_{\ln \Delta_6}$  и  $\sigma_{\ln \Delta_6}$ . Средние значения этих параметров для каждого месяца оценивали по многолетним данным гидрологических наблюдений. В целях подстраховки предполагали, что в течение последующих после даты составления прогноза суток максимальные расходы воды будут не ниже известного на эту дату максимального расхода.

При условии  $Q_{\max}(t) < Q_{\text{кр}}$  искомая прогностическая вероятность определяется формулой

$$p_{\text{кр},5}(Q_{\max}) = 1 - \Phi \left[ \frac{\ln(Q_{\text{кр}} - Q_{\max}) - \ln \bar{k} - m_{\ln \Delta_6}}{\sigma_{\ln \Delta_6}} \right]. \quad (7)$$

При условии  $Q_{\max}(t) \geq Q_{\text{кр}}$  эта вероятность равна единице:  $p_{\text{кр},5}(Q_{\max}) = 1$ .

На рис. 3 для створа р. Сочи – г. Сочи приведены графики функции прогностической вероятности  $p_{\text{кр},5}(Q_{\max})$  в ноябре, наиболее опасном месяце с точки зрения наводнений.



Сравнение приведенных на рис. 2 и 3 графиков демонстрирует, насколько вероятность превышения критических расходов воды в течение пяти суток выше, чем в течение одних.

### Заключение

Предложена региональная модель формирования талого и дождевого стока рек Черноморского побережья Кавказа, которая определяет общую схему прогнозирования расходов воды при наличии одного гидрометрического поста в замыкающем створе, одной метеостанции в пределах водосбора и отсутствии информации о состоянии снежного покрова.

Получена методика прогнозирования максимальных расходов и уровней воды с заблаговременностью одни сутки, которая для всех восьми речных створов имеет достаточно высокую точность и эффективность.

Разработана методика вероятностного прогнозирования наводнений с заблаговременностью одни сутки, которая в зависимости от полученного прогноза максимального расхода воды в замыкающем створе позволяет определять вероятность превышения критических значений расходов и уровней воды в течение следующих суток.

Предложена методика расчета критического значения суточного слоя осадков на метеостанции, при выпадении которых в течение ожидаемых суток критические значения расходов и уровней воды могут быть превышены с заданной вероятностью.

Разработана методика вероятностного прогнозирования наводнений с заблаговременностью пять суток, которая в зависимости от располагаемой на дату составления прогноза информации о водности реки позволяет определять вероятность превышения критических значений расходов и уровней воды в течение следующих пяти суток.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. Бефани Н.Ф. Прогнозирование дождевых паводков на основе территориально общих зависимостей. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 181 с.
3. Кучмент Л.С., Демидов В.Н., Мотовилов Ю.Г. Формирование речного стока. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 216 с.
4. Мухин В.М., Полунин 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.
5. Manual on Flood Forecasting and Warning // World Meteorological Organization. Geneva. 2011. No. 1072. 138 p.
6. Руководство по гидрологическим прогнозам. Вып. 2. Краткосрочный прогноз расхода и уровня воды на реках. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 245 с.

7. Guide to Hydrological Practices. Volume II. Management of Water Resources and Application of Hydrological Practices // World Meteorological Organization. Geneva. 2009. No. 168. 738 p.
8. Наставление по службе прогнозов. Раздел 3. Часть 1. Прогнозы режима вод суши. Л.: Гидрометеиздат, 1962. 193 с.
9. Христофоров А.В. Надежность расчетов речного стока. М.: Изд-во МГУ, 1993. 166 с.
10. Христофоров А.В. Теория случайных процессов в гидрологии. М.: Изд-во МГУ, 1994. 139 с.

**Сведения об авторах:**

Белякова Пелагея Алексеевна, гидролог, аспирант, кафедра гидрологии суши, географический факультет, Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова; Федеральное государственное бюджетное учреждение «Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации» (ФГБУ «Гидрометцентр России»), 123242, Москва, Большой Предтеченский переулок, д. 11–13; e-mail: pobel@mail.ru

Борщ Сергей Васильевич, к. г. н., заведующий отделом речных гидрологических прогнозов, Федеральное государственное бюджетное учреждение «Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации» (ФГБУ «Гидрометцентр России»), 123242, Москва, Большой Предтеченский переулок, д. 11–13; e-mail: borsch@mecon.ru

Христофоров Андрей Валентинович, д. г. н., профессор, кафедра гидрологии суши, географический факультет, Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова; ведущий научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение «Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации» (ФГБУ «Гидрометцентр России»), 123242, Москва, Большой Предтеченский переулок, д. 11–13; e-mail: khristoforov\_a@mail.ru

Юмина Наталья Михайловна, к. г. н., м. н. с., кафедра гидрологии суши, географический факультет, Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова; научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение «Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации» (ФГБУ «Гидрометцентр России»), 123242, Москва, Большой Предтеченский переулок, д. 11–13; e-mail: yuminanm@mail.ru