

УДК 556.06

А.В. Христофоров<sup>1</sup>, Н.М. Юмина<sup>2</sup>, П.А. Белякова<sup>3</sup>

## ПРОГНОЗ ПАВОДКОВОГО СТОКА РЕК ЧЕРНОМОРСКОГО ПОБЕРЕЖЬЯ КАВКАЗА С ЗАБЛАГОВРЕМЕННОСТЬЮ ОДНИ СУТКИ

В целях максимально раннего предупреждения об опасных паводках на реках Черноморского побережья Кавказа предлагается система методик прогнозирования расходов и уровней воды в 8 створах на реках Мзымта, Сочи, Западный Дагомыс, Куапсе, Туапсе и Вулан. Эти методики учитывают современные достижения в области моделирования гидрологических процессов и прогнозирования стока горных рек, природные особенности региона и практически всю доступную гидрометеорологическую информацию по водосборам указанных рек. 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 в зависимости от гидрометеорологической информации на дату составления прогноза. Предлагаемые методики прогноза выполняются в автоматизированном режиме в Гидрометцентре России и используются для оперативного предупреждения об опасных наводнениях на выбранных реках Черноморского побережья Кавказа.

*Ключевые слова:* прогнозирование, максимальный сток рек, Черноморское побережье Кавказа.

**Введение.** Для максимально раннего предупреждения об опасных паводках на реках Черноморского побережья Кавказа предлагается система методик прогнозирования расходов и уровней воды в 8 створах на шести реках этого региона (Вулан, Туапсе, Куапсе, Западный Дагомыс, Сочи, Мзымта). В основе методик лежит физико-статистическая модель формирования талого и дождевого стока, которая соответствует гидрометеорологической информации. Природные условия водосборов подробно описаны в работе [Панов и др., 2012]. Исследуемые водосборы имеют горный, сильно расчлененный рельеф с большими уклонами. В условиях теплого и влажного климата паводки на реках могут формироваться в любое время года. Особенно сильные и разрушительные паводки случаются летом, они вызваны ливнями большой интенсивности. На крупных реках, сходных с Мзымтой, высокие паводки также вызваны затяжными осенними дождями. На наиболее крупных реках района (Сочи и Мзымта) с большим перепадом высот на водосборе дождевые паводки могут накладываться на талый сток весеннего и весенне-летнего половодья [Волосухин и др., 2014; Панов и др., 2012].

В условиях высокой паводочной активности Черноморское побережье Краснодарского края часто подвергается наводнениям. В последние годы наиболее сильные наводнения отмечены в октябре

2010 г. (Туапсинский район), июле (Новороссийский и Геленджикский районы) и августе (Туапсинский район) 2012 г. [Магрицкий и др., 2013]. Условия возникновения наводнений проанализированы в работах [Магрицкий и др., 2013; Панов и др., 2012]. Детальное исследование формирования экстремального паводка на р. Ашамба 6 июля 2012 г., непосредственно предшествовавшего наводнению в Крымске, приведено в статье [Архипкин и др., 2013].

Наводнения в регионе могут быть вызваны как речными паводками (наводнения стокового происхождения), так и склоновыми потоками в результате выпадения ливней на застроенных территориях при плохом функционировании ливневой канализации (ливневые наводнения) [Магрицкий и др., 2013]. Перед авторами была поставлена задача разработать систему краткосрочного прогнозирования расходов и уровней воды для предупреждения наводнений стокового происхождения на основных реках Черноморского побережья Кавказа. Прогностические методики выполнены для рек Мзымта (пос. Красная Поляна и пос. Казачий Брод), Сочи (г. Сочи и с. Пластунка), Западный Дагомыс (пос. Дагомыс), Куапсе (с. Мамедова Шель), Туапсе (г. Туапсе) и Вулан (с. Архипо-Осиповка). Основные показатели морфометрии водосборов и характерные расходы этих рек приведены в табл. 1.

<sup>1</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра гидрологии суши, профессор, докт. геогр. н.; *e-mail:* khristoforov\_a@mail.ru

<sup>2</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра гидрологии суши, ст. преподаватель, канд. геогр. н.; *e-mail:* yuminanm@mail.ru

<sup>3</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра гидрологии суши, аспирантка; *e-mail:* pobel@mail.ru

Таблица 1

## Основные характеристики некоторых рек Черноморского побережья Кавказа

Река, створ	Площадь водосбора, км <sup>2</sup>	Средняя / максимальная высота водосбора, м	Средний расход воды, м <sup>3</sup> /с	Максимальный расход воды (м <sup>3</sup> /с) / дата
р. Вулан — с. Архипо-Осиповка	265	270 / 740	5,71	1050 / 12.11.1980
р. Туапсе — г. Туапсе	350	335 / 1380	13,1	230 / 01.08.1991
р. Куапсе — с. Мамедова Щель	14,6	380 / 922	0,72	115 / 01.08.1991
р. Зап. Дагомыс — пос. Дагомыс	48,0	365 / 920	2,44	511 / 22.08.1997
р. Сочи — с. Пластунка	238	840 / 2250	15,4	719 / 22.08.1997
р. Сочи — г. Сочи	296	720 / 2250	16,5	990 / 22.08.1997
р. Мзымта — пос. Красная Поляна	510	1670 / 3257	33,8	520 / 25.10.2003
р. Мзымта — пос. Казачий Брод	839	1340 / 3257	55,3	730 / 25.10.2003

В отечественной практике оперативного прогноза стока горных рек применяются разные методы прогнозов. Они опираются либо на концептуальные модели формирования стока, где основные процессы стокообразования описываются с помощью упрощенных полуэмпирических уравнений, либо на физико-статистические зависимости характеристик паводочного стока от метеорологических и гидрологических факторов. Концептуальная модель формирования стока горных рек используется для краткосрочного прогноза стока малых высокогорных притоков Кубани [Борщ и др., 2013]. Истоки модели восходят к работам в САНИГМИ под руководством Ю.М. Денисова (1965), подробное описание модели приведено в публикациях Л.Н. Боровиковой и Ю.М. Денисова (1970), Л.Н. Боровиковой (1972). В Гидрометцентре СССР также велись разработки по усовершенствованию модели, что нашло отражение в трудах В.Д. Комарова (1976), А.А. Полунина (1982, 1988) и др. Основная особенность концептуальной модели — описание формирования талого и тало-дождевого стока ведется для высотных зон, для которых должны быть заданы значения температуры воздуха и количество атмосферных осадков. При небольшом объеме метеорологических данных процессы снегонакопления и снеготаяния описываются с малой точностью из-за невозможности построить зависимости количества осадков от высоты, частично эта неточность компенсируется при выполнении процедуры коррекции [Борщ и др., 2013].

Активно и достаточно успешно используются физико-статистические методы прогнозов [Мухин, 2013], например для описания формирования дождевых паводков на равнинной части бассейна Кубани. Физико-статистические зависимости также положительно зарекомендовали себя в описании талого и тало-дождевого стока горных рек [Болтабаев и др., 1970].

В зарубежной практике для прогноза стока в бассейне Верхней Роны (Швейцария) используется модель формирования стока GSM-SOCONT,

согласно которой сток рассчитывается по частным водосборам по высотным зонам [García et al., 2009]. Расчетный шаг модели составляет 1 ч. Формирование стока рассчитывается отдельно для ледников и остальных типов поверхности бассейна.

**Материалы и методы исследований.** В качестве основы предлагаемых методик прогнозирования опасных паводков на реках Черноморского побережья Кавказа разработана региональная модель формирования речного стока. В ней учтены природные условия рассматриваемых водосборов и специфика гидрометеорологической информации. Для каждого водосбора можно использовать данные одного гидрометрического поста в замыкающем створе и одной метеостанции.

В связи с низкой дискретностью исходных гидрологических данных (шаг 1 сут) и данных об осадках (2 раза в сут) и особенностями поступления оперативной информации в Гидрометцентр России было решено разрабатывать методики гидрологического прогноза с временным шагом 1 сут. Методики нацелены на использование в оперативной практике в автоматическом режиме. Из-за малых размеров водосборов и больших уклонов их поверхности время формирования стока сопоставимо с интервалами между сроками гидрологических и метеорологических наблюдений и заблаговременностью прогноза.

Входной метеорологической информацией служат данные о среднесуточной приземной температуре воздуха и суточных осадках с сети наблюдений, а также прогностические значения этих метеоэлементов на сутки вперед по результатам расчета 4 численных моделей атмосферы (COSMO-RU07, Регион, NCEP и UKMO), интерполированных в координаты метеостанций. Использование метеорологического прогноза обеспечивает, с одной стороны, принципиальную возможность прогноза паводков, с другой — необходимо учитывать высокую степень неопределенности прогноза сильных осадков в горах из-за развития локальных процессов в речных долинах. Также существует проблема интерполя-

ции прогностических полей, поскольку предлагаемая гидрологическая модель использует точечные, а не площадные входные данные. В Гидрометцентре России значения температуры воздуха и количество осадков в пункте вычисляют из прогностических полей путем билинейной интерполяции, а для модели COSMO-RU07 — путем присвоения значения из ближайшего узла сетки [Багров, 2014; Борщ и др., 2013]. В условиях горного рельефа выбор метода интерполяции фактического количества осадков существенно сказывается на значениях метеоэлементов [Гандин и др., 1976] и может вызывать дополнительное снижение точности гидрологического моделирования [Tobin, 2012]. Однако представляется, что при низком качестве прогноза сильных осадков численными моделями [Багров, 2014] проблема интерполяции прогностических полей не столь принципиальна.

В гидрологическом прогнозе стока использованы результаты прогноза приземной температуры воздуха и количества атмосферных осадков для каждой из четырех указанных выше метеорологических моделей и их среднее значение по ансамблю моделей.

В зависимости от суточного слоя осадков и среднесуточной температуры воздуха определяли средний слой поступления дождевых вод на поверхность водосбора. Учитывали, что от температуры воздуха зависят потери на испарение, площадь и средняя высота части водосбора, на которую происходит поступление дождевых вод, а следовательно, при больших вертикальных градиентах осадков их средний слой для этой части водосбора. Для условного отделения жидких и твердых осадков принята изотерма  $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ , рекомендуемая при разработке моделей стока горных рек [Борщ и др., 2013; Руководство..., 1989] и успешно прошедшая проверку на притермоморских водосборах. Подбирали минимальную температуру ( $T_{\min,p}$ ), при которой изотерма  $2\text{ }^{\circ}\text{C}$  проходит через самую нижнюю точку водосбора, т.е. поступления дождевых вод на его поверхность еще нет. В зависимости от перепада высот водосбора и расположения метеостанции значение  $T_{\min,p}$  может варьировать от  $0,5$  до  $3,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Из-за отсутствия информации о состоянии снежного покрова средний слой поступления талых вод на поверхность водосбора определяли в зависимости от среднесуточной температуры приземного слоя воздуха — от нее зависят интенсивность снеготаяния и площадь водосбора, на которой они происходят. 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, талые воды на его поверхность не поступают. В зависимости от перепада высот водосбора и расположения метеостанции значение  $T_{\min,s}$  может варьировать от  $-2$  до  $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

При описании процессов формирования склонового стока учитывали, что для рек рассматриваемого региона потери на поверхностное задержание

незначительны. На участках с луговой растительностью и толщами моренных отложений быстро и с минимальными потерями формируются поверхностный и подповерхностный склоновые стоки. На оставшейся части водосбора формируются более заметные потери на пополнение запасов почвенной влаги [Панов и др., 2012; Guide..., 2009]. При оценке этих потерь использовали 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. Расходы склонового стока выражали через расходы воды в замыкающем створе за те же, а также за 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.

На основе описанной модели с использованием данных ежедневных гидрологических и метеорологических наблюдений за период с 1984 по 2010 г. разработана методика прогнозирования максимальных расходов и уровней воды с заблаговременностью одни сутки. В окончательном варианте учитывались данные 4 метеостанций: п. 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 использованы средние арифметические значения данных метеостанций в Туапсе и Сочи. Период гидрологических наблюдений варьирует от 35 до 80 лет, число лет совместных гидрологических и метеорологических наблюдений, использованных при составлении методики прогноза ( $n$ ), варьирует от 8 до 20.

**Методика прогнозирования максимальных расходов и уровней воды с заблаговременностью одни сутки.** Для оборудованных самописцами створов на р. Мзымта задача прогнозирования максимального расхода воды с заблаговременностью одни сутки решалась непосредственно. Для остальных 6 створов предварительно решали задачу прогнозирования среднесуточного расхода воды. В обоих случаях проанализированы десятки вариантов реализации уравнений модели, отличающихся составом предикторов, видом формулы получения прогноза и входящими в нее параметрами. Сравнивали варианты на основе оценки погрешности прогноза. В результате получена единая оптимальная схема прогнозирования среднесуточных или максимальных расходов воды.

Для оборудованных самописцами створов на р. Мзымта, чтобы получить прогноз максимального расхода воды на сутки ( $t + 1$ ), в качестве предикторов 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  $T(t+1)$ .

Расчет максимального прогнозируемого расхода воды мы предлагаем вести 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 (1) предполагает соблюдение следующих правил:

а) значения  $T(t+1)$  и  $T(t) > T_{\max}$ , необходимо заменять значением  $T_{\max}$ , которое определяли с помощью подбора. При достижении максимальной среднесуточной температуры  $T_{\max}$  дальнейшая динамика температур не сказывается на изменении речного стока. При таких высоких среднесуточных значениях температуры, как правило, не выпадают осадки, на реках происходит только спад расходов воды за счет сработки запасов грунтовых вод. Значение  $T_{\max}$  варьирует от 25 до 27 °С;

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

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

Параметры в формуле (1) оценивали методом наименьших квадратов для каждого месяца, таким образом учитывали различия в состоянии почвенного и растительного покрова водосборов в течение года, а также влияние метеоэлементов на сток.

Знак и величина каждого содержащегося в уравнении регрессии коэффициента отнюдь не обязательно отражают характер связи между прогнозируемой величиной и соответствующим предиктором, но зависят от статистических связей с другими предикторами. Поясним на примере регрессии с двумя предикторами: при положительной корреляции каждого из двух предикторов с прогнозируемой величиной и между собой стоящие при этих предикторах коэффициенты в уравнении регрессии могут иметь разные знаки.

Для остальных шести необорудованных самописцами речных створов прогноз среднесуточного расхода  $\tilde{Q}(t+1)$  получен 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 предлагается находить в виде  $\tilde{Q}_{\max}(t+1) = \bar{k} \tilde{Q}_{\max}(t+1)$ , где  $\bar{k}$  — рассчитанное для каждого месяца среднее многолетнее от-

ношение месячных максимумов к соответствующим среднесуточным расходам воды.

**Методика вероятностного прогнозирования наводнений с заблаговременностью одни сутки.** Для каждого речного створа были заданы критические значения уровня и расхода воды, соответствующие разным 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 гидрологического 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  $m_{\ln \epsilon}$  и средним квадратическим отклонением  $\sigma_{\ln \epsilon}$ . Эти параметры оценивали с учетом автокорреляции используемых рядов и соотношения между их продолжительностью и числом параметров в формуле получения прогноза [Христофоров, 1993].

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

$$p_{кр}(\tilde{Q}_{\max}) = 1 - \Phi \left( \frac{\ln Q_{кр} - \ln \tilde{Q}_{кр} - m_{\ln \epsilon}}{\sigma_{\ln \epsilon}} \right), \quad (2)$$

где  $\Phi(x)$  — функция Лапласа нормального распределения вероятностей с нулевым математическим ожиданием и единичной дисперсией. На рис. 1 для створа р. Сочи — г. Сочи приведены графики функции прогностической вероятности  $p_{кр}(\tilde{Q}_{\max})$  в ноябре, наиболее опасном месяце с точки зрения наводнений.

**Результаты исследований и их обсуждение.** В основе предлагаемой региональной модели формирования стока лежат 12 прогностических зависимостей, параметры которых оценивали для каждого из 8 речных створов. Параметры применяемых регрессионных уравнений не имеют четкой физической интерпретации. Такая структура модели без явного описания стокообразующих процессов (как и любая модель вроде “черного ящика”) оставляет открытой проблему результата прогноза при “неожиданных” комбинациях значений предикторов

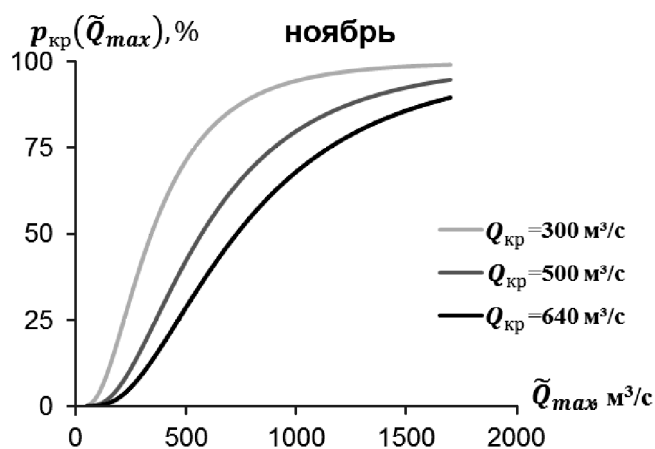


Рис. 1. Графики функции прогностической вероятности  $p_{кр}(\tilde{Q}_{max})$  для ноября в створе р. Сочи — г. Сочи. Значения  $Q_{кр}$  соответствуют трем уровням опасности: отметке для подачи штормовых телеграмм, отметке неблагоприятного явления и отметке опасного явления

[Manual..., 2011]. Однако, в отличие от более сложных моделей, она отвечает доступной на данный момент гидрометеорологической информации и удовлетворяет требованиям к качеству гидрологического прогноза.

Качество методики прогноза определяли согласно принятым рекомендациям на независимом материале [Руководство..., 1989; Manual..., 2011]. Исключали данные за один год, переоценивали параметры, а данные за исключенный год использовали для сравнения прогнозируемых расходов воды с их фактическими значениями. На рис. 2 приведены примеры совмещенных графиков колебаний

фактических и рассчитанных по прогностической формуле максимальных расходов воды. При получении оценки средней квадратической погрешности прогноза  $\sigma_{пр}$  применяли теоретическую формулу, которая учитывает не только разности между фактическими и прогнозируемыми расходами воды, но и соотношение между длиной использованного ряда наблюдений и числом оцениваемых по нему параметров прогностической формулы [Христофоров, 1993]. Эффективность прогноза определялась соотношением  $\sigma_{пр}/\sigma_{\Delta}$ , где  $\sigma_{\Delta}$  характеризует погрешность инерционного прогноза [Руководство..., 1989]. В табл. 2 приведены значения множественного коэффициента корреляции для предлагаемых прогностических зависимостей ( $R$ ), их погрешности ( $\sigma_{пр}$ ) и показателя эффективности прогноза ( $\sigma_{пр}/\sigma_{\Delta}$ ), 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. Эти данные свидетельствуют о том, 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 надежных зависимостей уровней воды от расходов  $Q(H)$  позволяет достаточно точно прогнозировать на сутки вперед и уровни воды. Проверка в оперативном режиме также показывает положительные результаты.

Таблица 2

Характеристики предлагаемых прогностических зависимостей

Река, створ	$n$	$\sum_{i=1}^{24} N_i$	$R$	$\sigma_{пр}, \text{ м}^3/\text{с}$	$\sigma_{пр}/\sigma_{\Delta}$
р. Вулан	20	7238	0,78	6,4	0,56
р. Туапсе	9	3189	0,86	14,2	0,53
р. Куапсе	19	6691	0,80	0,85	0,62
р. Западный 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

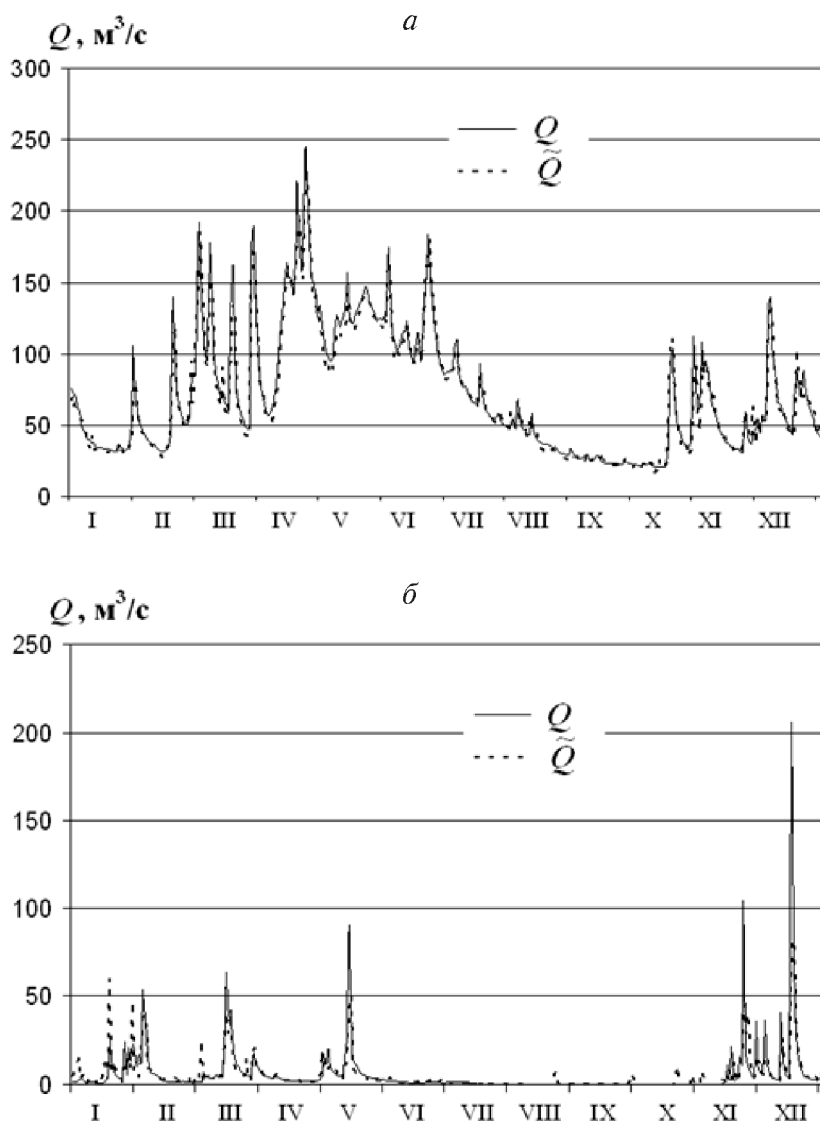


Рис. 2. Фактический (сплошная линия) и спрогнозированный (пунктирная линия) графики колебаний максимальных расходов воды: *a* — в створе р. Мзымта — пос. Красная Поляна в 2002 г.; *б* — в створе р. Вулан — пос. Архипо-Осиповка в 1994 г.

Структура распределения погрешностей методик внутри года имеет сложный вид. В наиболее опасный с точки зрения формирования катастрофических паводков летний период  $\sigma_{пр}/\sigma_{\Delta} = 0,6 \pm 0,8$ , что соответствует удовлетворительному качеству прогноза. Представляется, что результаты гидрологического прогноза по такой физико-статистической модели можно использовать в качестве базового материала при оперативном прогнозировании паводков на реках Черноморского побережья Кавказа.

Кроме того, вероятностный вид прогноза позволяет внимательнее относиться к прогнозным значениям расходов воды в контексте возможностей используемой гидрологической модели.

Успех прогноза паводков во многом зависит от надежности метеорологического прогноза, в частности прогноза сильных осадков. В горной зоне эта задача крайне сложна, с одной стороны, из-за сильного влияния местных условий на формирование кучево-дождевой облачности, которые пока невозможно учесть в прогностических моделях, а с дру-

гой — недостаточно пунктов наблюдений за осадками, что позволило бы проводить эффективную проверку расчетных методов [Волосухин, Ткаченко, 2014]. Автоматизированные прогнозы необходимо уточнять сверхкраткосрочными прогнозами на основе спутниковых и радарных данных об облачности, а также с использованием оперативной информации об уровнях воды и осадках, поступающей с автоматизированной сети мониторинга за паводковой ситуацией в Краснодарском крае.

**Выводы:**

- 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;

- создана методика прогнозирования максимальных расходов и уровней воды с заблаговременностью одни сутки, которая для всех 8 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 пре-

вышения критических значений расходов и уровня воды в течение следующих суток;

— предложенная методика используется для выпуска прогноза в Гидрометцентре России полностью в автоматическом режиме, результаты расчетов служат базовым материалом для оперативного прогнозиста-гидролога.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

## REFERENCES

- Архипкин В.С., Добролюбов С.А., Мухаметов С.С. и др. Экстремальный дождевой паводок в бассейне р. Ашамба и его влияние на рельеф дна и структуру вод моря в районе г. Геленджик // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2013. № 3. С. 27–34.
- Arkhipkin V.S., Dobrolyubov S.A., Mukhametov S.S. et al. Ekstremalniy dozhdevoy pavodok v basseyne r. Ashamba i yego vliyaniye na rel'ef dna i strukturu vod morya v rayone g. Gelendzhik [Extreme rainfall in the basin of the Ashamba river and its impact of the bottom relief and sea water structure in the vicinity of the town of Gelendzhik], Vestnik Moskovskogo Universiteta, seria 5, Geografiya, 2013, no 3, pp. 27–34 (in Russian).
- Багров А.Н. Сравнительная оценка успешности прогнозов сильных осадков с помощью моделей атмосферы различного масштаба // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. 2014. № 41. С. 63–73.
- Bagrov A.N. Sravnitel'naya ocenka uspeshnosti prognozov silnyh osadkovs pomosh'yu modeley atmosfery razlichnogo masshtaba [Comparative estimates of the success of heavy precipitation forecasts using atmospheric models of various scales], Informacionnyi sbornik, 2014, no 41, pp. 63–73 (in Russian).
- Болтабаев В.Г., Овчинников А.М. Краткосрочные прогнозы стока горных рек методом множественной регрессии // Тр. САНИГМИ. 1970. Вып. 52 (67). С. 90–98.
- Boltabayev V.G., Ovchinnikov A.M. Kratkosrochnyye prognozy stoka gornyh rek metodom mnozhestvennoy regressii [Short-range forecasts of mountain rivers runoff with multiple regression], Trudy Sredneaziatkogo nauchno-issledovatel'skogo gidrometeorologicheskogo instituta, 1970, V. 52 (67), pp. 90–98 (in Russian).
- Борщ С.В., Симонов Ю.А. Оперативная система краткосрочных гидрологических прогнозов расхода воды на реках бассейна Кубани // Тр. Гидрометцентра России. 2013. Вып. 349. С. 63–87.
- Borsch S.V., Simonov Yu.A. Operativnaya sistema kratkosrochnih gidrologicheskikh prognozov raskhoda vody na rekah basseyna Kubani [Operational water discharge short-range forecasting system for the Kuban basin rivers], Trudy Gidrometcentra Rossii, 2013, V. 349, pp. 63–87 (in Russian).
- Волосухин В.А., Ткаченко Ю.Ю. Организация гидрологического мониторинга с целью информационного обеспечения региональной системы предупреждения чрезвычайных ситуаций и защиты населенных пунктов (на примере Краснодарского края) // Наука и безопасность. 2014. № 2 (11). С. 65–67.
- Volosukhin V.A., Tkachenko Yu.Yu. Organizatsiya gidrologicheskogo monitoringa s cel'yu informacionnogo obespecheniya regionalnoy sistemy preduprezhdeniya chrezvychaynykh situatsiy i zaschity naselennykh punktov (na primere Krasnodarskogo kraya) [Organization of hydrological monitoring to support the regional system of emergency prevention and settlements protection (the example of Krasnodar kraj)], Nauka i bezopasnost', 2014, no 2 (11), pp. 65–67 (in Russian).
- Гандин Л.С., Казан Р.Л. Статистические методы интерпретации метеорологических данных. Л.: Гидрометеоздат, 1976. 359 с.
- Gandin L.S., Kagan R.L. Statisticheskiye metody interpretatsii mereorologicheskikh dannyh [Statistic methods of meteorological data interpretation], Gidrometeoizdat, Leningrad, 1976, 359 p. (in Russian).
- Магрицкий Д.В., Алексеевский Н.И., Крыленко И.Н. и др. Риски наводнений в низовьях и устьях рек Черноморского побережья России // Водная стихия: опасности, возможности прогнозирования, управления и предотвращения угроз: Мат-лы Всеросс. науч. конф., Краснодар, 7–13 октября 2013 г. Новочеркасск: ЛИК, 2013. С. 181–187.
- Magrickiy D.V., Alekseyevskiy N.I., Krylenko I.N. et al. Riski navodneniy v nizov'yah i ust'yah rek Chernomorskogo poberezh'ya Rossii [Flood risks in downstream and estuaries of the rivers of the Black Sea coast of Russia], materials of All-Russian science conference — water element: risks, forecasting opportunities, management and prevention of threats, Krasnodar, 7–13 Oct. 2013, pp. 181–187 (in Russian).
- Мухин В.М. Методические основы физико-статистических видов краткосрочных прогнозов стока горных рек // Тр. Гидрометцентра России. 2013. Вып. 349. С. 5–46.
- Mukhin V.M. Metodicheskiye osnovy fiziko-statisticheskikh vidov kratkosrochnih prognozov stoka gornyh rek [Methodological basis of physical-statistical kinds of short range forecasts of mountain river runoff], Trudy Gidrometcentra Rossii, 2013, V. 349, pp. 5–46 (in Russian).
- Панов В.Д., Базелюк А.А., Лурье П.М. Реки Черноморского побережья Кавказа: гидрография и режим стока. Ростов-на-Дону: Донской изд. дом, 2012. 605 с.
- Panov V.D., Bazeluk A.A., Lur'ye P.M. Reki Chernomorskogo poberezh'ya Kavkaza: gidrografia i rezhim stoka [Rivers of the Black Sea coast of Caucasus: hydrography and flow regime], Donskoy izdatelkiy dom, Rostov-na-Donu, 2012, 605 p. (in Russian).
- Руководство по гидрологическим прогнозам. Вып. 2. Краткосрочный прогноз расхода и уровня воды на реках. Л.: Гидрометеоздат, 1989. 245 с.
- Rukovodstvo po gidrologicheskim prognozam, V. 2, Kratkosrochniy prognoz raskhoda i urovnya vody na rekah [Guide to hydrological forecasting, V. 2, Short-range forecasting of water discharge and level at rivers], Gidrometeoizdat, Leningrad, 1989, 245 p. (in Russian).
- Христофоров А.В. Надежность расчетов речного стока. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1993. 166 с.
- Khristoforov A.V. Nadezhnost' raschetov rechnogo stoka [Reliability of river flow estimates], Izdatelstvo Moskovskogo universiteta, Moscow, 1993, 166 p. (in Russian).

*García Hernández J., Jordan F., Sirvent Gimenez P.* et al. Ensemble hydrological forecasts for the Upper Rhone river basin // 33<sup>rd</sup> Congr. of IAHR — Water engineering for a sustainable environment. Vancouver, Canada. August 9–14. 2009. P. 1171–1178.

Guide to Hydrological Practices. Vol. I. Hydrology — From Measurement to Hydrological Information // World Meteorol. Organization. Geneva, 2009. N 168. 738 p.

Manual on Flood Forecasting and Warning. // World Meteorol. Organization. Geneva, 2011. N 1072. 138 p.

*Tobin C.* Improving Alpine flood prediction through hydrological process characterization and uncertainty analysis. Swiss Federal Institute of Technology in Lausanne, 2012. PhD Thesis. N 5416. 165 p.

Поступила в редакцию  
13.10.2014

**A.V. Khristoforov, N.M. Yumina, P.A. Belyakova**

**A ONE-DAY LEAD TIME FLOOD FORECAST FOR THE RIVERS OF THE BLACK SEA  
COAST OF THE CAUCASUS**

Methods of forecasting water levels and discharges for Mzymta, Sochi, West Dagomys, Kuapse, Tuapse and Vulcan rivers were developed in order to provide for the early warning of the river flood risk at the Black Sea coast of the Caucasus. The methods take into account the advances in the modeling of hydrological processes and forecasting of the mountain rivers discharge, as well as the natural conditions of the region and virtually all hydrometeorological information for the basins of the above rivers. A technique of rather accurate and efficient forecasting of maximum discharges and water levels with a lead time of one day was elaborated basing on the regional model of snowmelt and rain runoff formation. A scheme for the computation of a daily precipitation amount which could cause the excess of critical flow rates and water levels with a given probability during the next 24 hours was suggested for the meteorological stations. Methods of computation of the dangerous flooding probability during the next day using the available actual hydrometeorological information were elaborated. The proposed techniques are implemented at the Hydrometeorological Centre of Russia using the computer-aided procedures and are applied for the early warning of dangerous floods on particular rivers of the Black Sea coast of the Caucasus.

*Key words:* flood forecasting.