ОПЕРАТИВНАЯ СИСТЕМА КРАТКОСРОЧНЫХ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ПРОГНОЗОВ РАСХОДА ВОДЫ НА РЕКАХ БАССЕЙНА КУБАНИ

С.В. Борщ, Ю.А. Симонов

Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации
borsch@mecom.ru, simonov@mecom.ru

Введение

Бассейн реки Кубани является одним из наиболее неблагоприятных районов с точки зрения ущерба, причиняемого паводками, формирующимися и проходящими в его речной системе. Согласно результатам работ, обобщающих исследования по ущербу от наводнений на речных системах России [5, 7], бассейн р. Кубани занимает ведущее место по удельному ущербу от наводнений на единицу площади – в несколько раз превышая данный показатель по рекам Северного Кавказа в целом и на порядок превышая среднее значение по территории России. Только последние катастрофические наводнения на Кубани, имевшие место в 2002 и 2012 гг., принесли колоссальный разрушительный эффект: погибли сотни человек, экономика понесла миллиардные убытки.

Для минимизации ущерба от наводнений на реках Кубани в ФГБУ «Гидрометцентр России» разработана система краткосрочных гидрологических прогнозов расхода (уровня) воды. Основная цель данной системы – повысить уровень предупрежденности экстренных служб, администраций и населения о возможном прохождении паводков, что в итоге должно обеспечить уменьшение экономического ущерба, а также, наиболее важно, позволит избежать (или по максимуму сократить) гибель людей при прохождении паводков. Устойчивость работы системы прогнозов достигается ее автоматизацией – прогноз выпускается без участия прогнозиста ежедневно вечером с заблаговременностью от 1 до 3 суток. Прогностические данные автоматически передаются в оперативно-прогностическое подразделение Росгидромета, в чью зону ответственности входит р. Кубань (Гидрометцентр г. Ростова). В ближайшее время будут завершены работы по визуализации выпускаемых прогнозов на сайте ФГБУ «Гидрометцентр России».

Информационное обеспечение прогнозов

В действующей на данный момент версии системы гидрологического прогнозирования расчет и выпуск прогнозов выполняется на основе данных о расходе воды, температуре воздуха и атмосферных осадках. Задание входной метеорологической информации на период

заблаговременности гидрологического прогноза осуществляется путем усвоения прогностической информации, вырабатываемой метеорологическими моделями, функционирующими в оперативном режиме в Гидрометцентре России и в других центрах гидрометеорологического прогнозирования. Расчеты в системе прогнозирования по бассейну Кубани ведутся с шагом по времени, равным одним календарным суткам (МСК).

В целом можно отметить, что бассейн р. Кубани достаточно полно освещен гидрометеорологическими наблюдениями. Вместе с тем пункты гидрометеорологических наблюдений в бассейне Кубани расположены весьма неравномерно, что вносит свои особенности в работу автоматизированной системы прогноза. В ней используются данные по расходам воды, регулярно поступающие в Гидрометцентр России с 24 гидрологических постов и 27 метеорологических станций (рис. 1). Действующие гидрологические посты расположены в большинстве своем в равнинной зоне и в предгорьях (72 % постов), а в высокогорной части, где расположена зона формирования стока – 28 %. В бассейне р. Кубани наибольшее количество атмосферных осадков (до 2000–3000 мм) выпадает на высотах 2000–3000 м в районе Главного или Водораздельного хребта Большого Кавказа. К этой же зоне приурочено современное оледенение и основные запасы сезонного и многолетнего снега. Соответственно, в этой высотной зоне происходит формирование основной массы речного стока. В тоже время сведения о погодных условиях, в т.ч. о количестве атмосферных осадков, из этой высотной зоны в настоящее время не поступают, за исключением единственной в бассейне метеорологической станции Клухорский перевал (2037 м). Для прогноза расходов воды на реках Кубани использовались прогностические поля приземной температуры воздуха и осадков следующих численных моделей атмосферы:

- гидродинамическая неадиабатическая региональная модель прогноза основных метеорологических величин «REGION», разработанная в ФГБУ «Гидрометцентр России» [8]. Оперативный вариант модели имеет 20 расчетных уровней, шаг расчетной сетки по горизонтали составляет 25 км, прогноз считается на срок до 48 ч два раза в сутки (0 и 12 ч ВСВ);
- система краткосрочного негидростатического прогноза погоды COSMO-RU07 с шагом сетки 7 км [6, 13]. Модель имеет 40 основных расчетных уровней. Используются результаты прогноза модели на срок до 72 ч, прогноз выпускается четыре раза в сутки (00, 06, 12 и 18 ч ВСВ);
- модель Национального центра прогнозирования состояния окружающей среды (NCEP) США, прогнозы которой поступают в Гидрометцентр России четыре раза в сутки (00, 06, 12 и 18 ч ВСВ) на срок до 72 ч. Пространственное разрешение сетки модели составляет 0,5º;

- модель Метеорологической службы Великобритании (UKMO), данные которой поступают в Гидрометцентр России на сетке 1,25º от двух сроков выпуска прогнозов (00, 12 ч ВСВ).

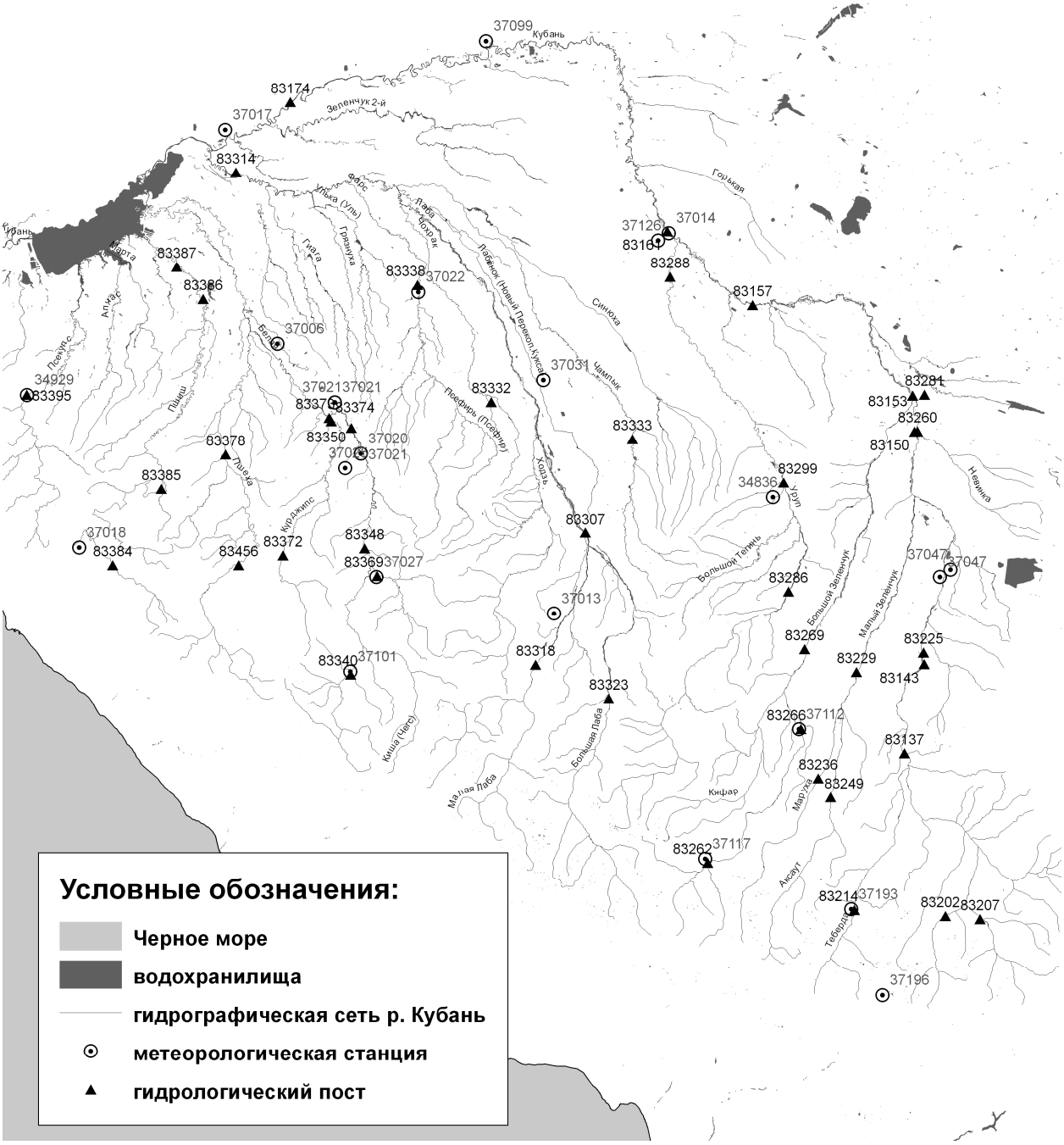

Рис. 1. Сеть метеорологических станций и гидрологических постов, используемая при оперативном выпуске краткосрочных прогнозов расхода воды.

Прогностические значения метеорологических элементов в узлах регулярных сеток интерполируются в точки расположения метеорологических станций. При этом используется алгоритм билинейной интерполяции. Таким путем выполняется в оперативном режиме задание для всех 27 метеостанций прогнозных значений метеорологических элементов

(приземная температура, сумма осадков и некоторые другие метеорологические параметры), являющихся входными переменными для расчетов гидрологических величин.

Результаты испытаний метеорологических моделей, прогноз которых используется при выпуске оперативных краткосрочных прогнозов расхода воды на реках бассейна Кубани, приводятся в ряде работ [1, 3, 14]. В рамках данной работы наибольший интерес представляет оценка точности прогнозирования температуры воздуха и выпадения осадков. Рассмотрение эффективности прогнозирования по оперативным метеорологическим моделям позволяет считать, что прогнозы температурного режима имеют точность, достаточную для использования в системе гидрологического прогнозирования – среднеквадратические ошибки прогноза температуры воздуха моделей REGION, COSMO, NCEP и UKMO на 24, 48 и 72 ч не превышают 2,3, 2,5 и 2,7 °С соответственно [14].

В наибольшей степени успешность прогнозирования паводков в бассейне Кубани определяется надежностью прогноза атмосферных осадков. Прежде всего, это относится к теплому периоду года. Сравнительная оценка успешности прогнозов осадков за период с апреля по сентябрь 2011 года для Европейской территории России представлена в работе [3]. В ней показано, что в целом численный прогноз факта выпадения осадков является вполне успешным по всем рассмотренным моделям. Критерий Пирси-Обухова принимает значения в диапазоне 0,48–0,59 для различных величин заблаговременности (прогноз считается практически значимым при значении критерия более 0,30).

Информационное обеспечение автоматизированной системы гидрологического прогнозирования основано на использовании специально разработанной оперативной базы данных «RIVR», функционирующей и поддерживаемой в рамках автоматизированной системы обработки оперативной информации Гидрометцентра России [15]. В базе данных «RIVR» размещается весь объем раскодированной гидрометеорологической информации по бассейну Кубани, а также прогностические поля метеорологических элементов используемых метеорологических моделей и выпускаемые гидрологические прогнозы.

Гидрологические модели

Бассейн р. Кубани, как и любой другой горный бассейн, отличается рядом особенностей, которые необходимо учитывать при разработке методов краткосрочного прогнозирования расходов (уровней) воды. Наиболее существенной из них является присущая горным водосборам зависимость природных условий от высоты местности. Это приводит к тому, что в различных высотных зонах горного водосбора складываются существенно различные условия формирования стока. Например, с точки зрения растительности, почвенного покрова, климатических параметров на одном склоне горного

хребта процесс формирования стока может соответствовать условиям, характерным для природных зон от субтропической до арктической. Кроме того, скорость отдачи воды в русловую сеть горного водосбора составляет от нескольких минут от начала выпадения осадков. В разработанной для бассейна Кубани автоматизированной системе краткосрочных прогнозов реализованы два подхода к прогнозированию расходов воды. Один основан на использовании физико-статистических зависимостей характеристик паводочного стока от метеорологических и гидрологических факторов, второй – на использовании концептуальной модели формирования стока в горных водосборах бассейна р. Кубани.

Физико-статистические зависимости характеристик паводочного стока от факторов формирования паводков использовались для прогнозирования стока дождевых паводков в створах по всему бассейну Кубани. Методики прогноза разрабатывались индивидуально для каждого притока Кубани, сообразуясь с гидрометеорологическими и физико-географическими условиями в их бассейнах. Для определения коэффициентов прогностических уравнений применен единый метод – решение обратных задач по входным и выходным данным с помощью метода наименьших квадратов. Учитывая, что большое число включаемых в прогностические уравнения переменных приводит, как правило, к неустойчивым результатам, в уравнения включались не более трех независимых переменных. Эти переменные были представлены комбинациями средних по бассейнам температур воздуха, осадков и расходов воды в день составления прогнозов [10, 11]. В настоящий момент прогнозы расходов воды с использованием физико-статистических зависимостей выпускаются в период с мая по октябрь для 10 гидрологических створов.

Краткосрочные прогнозы расходов воды рек, относящихся к части бассейна Кубани, расположенной выше Краснодарского водохранилища, основаны на модели формирования тало-дождевого стока в горном водосборе. Водосборы рек этой части бассейна Кубани характеризуются большим диапазоном высотных отметок и включают как высоко расположенные области, в том числе ледники и области вечных снегов, так и участки среднегорья и предгорий. Как уже было упомянуто выше, для таких бассейнов описание процесса формирования стока не может быть выполнено сразу для всей их площади и представляется обязательным ее разбиение на некоторое количество высотных зон. Границами таких высотных зон являются изогипсы. Разность высотных отметок изогипс, ограничивающих высотную зону, принималась равной 0,2 км. Для выполнения расчетов для всех высотных зон рассматриваемых бассейнов должны быть известны их площади, а также площади частей зон, занимаемые ледниками и покрытые лесом. Площади и другие морфометрические характеристики высотных зон (уклон, средняя высота, экспозиция и т.д.) определялись на основе цифровой модели рельефа с шагом 100 м в программном комплексе

ArcGIS Desktop 10.0 (ГИС). Распределение площадей ледников по высотным зонам определялось по данным Каталога ледников, а площадей, покрытых лесом, – по литературным данным. Отметим, что в существующей версии модели формирования стока некоторые из морфометрических характеристик не используются. Всего для рассматриваемой территории прогнозирование расходов воды по концептуальной модели осуществляется для 12 створов.

В используемом описании процесса формирования стока на горном водосборе в качестве входной метеорологической информации требуются данные об атмосферных осадках и о среднесуточной температуре воздуха, которые должны быть заданы для каждой высотной зоны в каждый расчетный интервал времени (расчеты проводятся с шагом по времени, равняющимся одним суткам). Расчет значений температуры воздуха в высотных зонах осуществляется с использованием допущения о линейной зависимости температуры воздуха от высоты местности [2]:

$$\theta_{z,t} = \theta_{0,t} - \gamma_t \cdot (z - z_0),$$

где $\theta_{z,t}$ – среднесуточная температура воздуха на высоте z в t –е сутки; γ_t – вертикальный градиент температуры в t -е сутки календарного года; z – высотная отметка в диапазоне высот речного бассейна (для высотной зоны принималась равной полусумме отметок ограничивающих ее изогипс); z_0 – высотная отметка осреднения значений температуры. Осредненное значение среднесуточной температуры воздуха на высоте z_0 за t-е сутки $\theta_{0,t}$ вычисляется по данным имеющихся метеостанций:

$$\theta_{0,t} = \frac{1}{n_\theta}\sum_{i=1}^{n_\theta}\theta_{i,t} + \gamma_t \cdot \left(\frac{1}{n_\theta}\sum_{i=1}^{n_\theta} z_i - z_0\right),$$

где z_i – высотная отметка i-го пункта наблюдений за температурой; $\theta_{i,t}$ – средняя суточная температура воздуха на этом пункте. Полученные по данным о норме среднемесячной температуры воздуха на метеостанциях значения вертикального градиента температуры (принимаемые одинаковыми для всех рассматриваемых рек верхней части бассейна Кубани) рассчитывались по следующему выражению:

$$\gamma_t = \gamma_0 + a_\theta \times cos\left[(t - t_0)\cdot\frac{2\cdot\pi}{365}\right],$$

где γ_0 = 5,04 °С/км; a_θ = 1,57, t_0 = 186.

Для описания распределения осадков по территории горного водосбора обычно применяется нелинейная (квадратичная) зависимость величины выпадающих осадков от высоты [2]. В нашем случае малое число метеостанций не позволяло выполнить сколько-

нибудь обоснованное построение таких зависимостей для притоков Кубани. Поэтому для каждого из бассейнов определялся диапазон высотных зон, значение осадков в которых принималось в соответствии с данными одной из используемых метеостанций.

В используемой схематизации процесса формирования стока на водосборе важной частью является описание динамики снежного покрова [4, 12], в соответствии с которой допускается, что для данной территории, в частности для высотной зоны речного бассейна, существует некоторое устойчивое распределение снегозапаса по территории, которое имеет снежный покров достаточно большой мощности, в частности, снежный покров в конце зимнего сезона. На равнинной части Европейской территории России такой устойчивостью обладает распределение максимальных (предвесенних) снегозапасов. Обычно считается, что оно с достаточной точностью описывается известным в теории вероятности двухпараметрическим γ–распределением.

Использование в модели формирования стока γ–распределения, однако, не совсем удобно, поскольку не позволяет получить простые и наглядные соотношения для расчета величины снегозапаса и количества жидкой воды, удерживаемой снегом. Вместо него нами использовано усеченное экспоненциальное распределение следующего вида:

$$G(s)=\begin{cases}0 & \text{при } s \le Q \\ 1-\boldsymbol{exp}\left(-\dfrac{s-Q}{P}\right) & \text{при } Q \le s \le Q+P\cdot ln(m), \\ 1 & \text{при } s \ge Q+P\cdot ln(m)\end{cases}$$

где P, Q и m – параметры G-распределения.

Значение параметра m является постоянным для данной части (лесной или полевой) высотной зоны. Значения же параметров P и Q меняются в зависимости от величины снегозапаса $\overline{S}$, имеющегося в данный момент на рассматриваемой части зоны, по следующим соотношениям:

$$\overline{S}=Q+P\cdot\left(1-\frac{1}{m}\right),$$

$$P=\frac{C_V}{\sqrt{1-\dfrac{2\cdot ln(m)}{m}-\dfrac{1}{m^2}}}\cdot\overline{S}\ .$$

Выражение содержит еще один параметр G-распределения: коэффициент вариации запаса воды в снежном покрове C_V. Как и значение параметра m, значение C_V является постоянной величиной для данной части высотной зоны. Величины этих параметров определяются по имеющимся натурным, справочным или литературным данным о

распределении максимального снегозапаса (сформировавшегося к началу интенсивного снеготаяния).

Параметры Q, P и m имеют следующий геометрический смысл: параметр Q определяет наименьшее значение снегозапаса на рассматриваемом участке высотной зоны, P является показателем экспоненты, а m задает наибольшее значение снегозапаса $S_{max} = Q + P \cdot ln(m)$. Площади, на которой залегает наибольший снегозапас, на графике функции соответствует ступенька при $s = S_{max}$, соответствующая ей площадь равна $1 / m$. Задание значений C_v и m фиксируют отношение параметров P и Q, что позволяет рассчитывать их значение при изменении снегозапаса $\overline{S}$.

Распределение $G(s)$ применимо для снежного покрова, формирующегося за счет выпадении снега и не нарушенного его таянием. В случаях частичного стаивания снежного покрова и выпадения снега на частично стаявший снежный покров используется распределение $F(s)$ следующего вида:

$$F(s) = \begin{cases} 0 & \text{при } s \le R \\ 1 - \boldsymbol{exp}\left(-\dfrac{s-Q}{P}\right) & \text{при } R \le s \le Q + P \cdot ln(m) \\ 1 & \text{при } s \ge Q + P \cdot ln(m) \end{cases}$$

где $Q > -P \cdot ln(m)$, $0 < R < Q + P \cdot ln(m)$.

В процессе выпадения снега на снежный покров, имеющий распределение $F(s)$, в модели предусмотрена постепенная трансформация этого распределения к виду $G(s)$.

Учет количества жидкой воды, удерживаемой снежным покровом, осуществлялся в предположении постоянной величины водоудерживающей способности снега $\varepsilon_n = 0{,}13$. Слой снега мощностью s (в мм водного эквивалента) может удержать s_2 мм жидкой воды:

$$s_2 = \frac{\varepsilon_n}{1 - \varepsilon_n} \cdot s = \varepsilon_2 \cdot s \, .$$

Текущей (определенной для данного шага времени) расчетной характеристикой количества жидкой воды является значение ее максимального слоя x_2, выражаемое в миллиметрах. Характеристикой общего объема жидкой воды v_2 является его значение, выраженное в миллиметрах, отнесенных ко всей площади части высотной зоны. При известных x_2 и $F_2(s)$ значение v_2 рассчитывается по соотношению:

$$v_2(x_2) = \int_0^{x_2} F_2(s)\, ds \ ,$$

где $F_2(s)$ – распределение величины s_2 (максимальной водоудерживающей способности) по площади части (лесной или полевой) высотной зоны:

$$F_2(s) = F \cdot \left(\frac{1-\varepsilon_n}{\varepsilon_n} \right) \cdot s$$

Выпадающие в высотной зоне осадки разделяются по фазовому состоянию в зависимости от среднесуточной температуры воздуха θ: считаем, что при $\theta > 2$ °С осадки выпадают в виде дождя, а иначе – в виде снега. Таким образом, в расчетные сутки могут происходить следующие процессы: выпадение снега ($\theta \leq 0$ °С), таяние и выпадение снега (0 °С $< \theta <$ 2 °С) и таяние и выпадение жидких осадков ($\theta \geq 2$ °С). В первом и третьем случаях расчеты переформирования снежного покрова и его водоотдачи выполняются за один шаг, а во втором – за три шага: выпадение половины количества снега, определенного для высотной зоны; стаивание $k_m \cdot \theta$ мм снега; выпадение второй половины количества снега, определенного для высотной зоны.

Величина водоотдачи снежного покрова q_t определяется на шаге расчета, соответствующем таянию и выпадению жидких осадков, по воднобалансовому соотношению:

$$q_t = S_{V,t} + v_{2,t} + a - S_{V,t+1} + v_{2,t+1} \ ,$$

где S_V – количество воды (в миллиметрах на площадь рассматриваемой части высотной зоны) в снежном покрове, которое для используемого нами F - распределения определяется по формуле:

$$S_V = R + P \cdot \left[exp\left(\frac{Q-R}{p} \right) - \frac{1}{m} \right] .$$

Расчеты по описанной схеме проводятся за каждый расчетный период (сутки) по всем высотным зонам речного бассейна, отдельно для лесной и полевой частей. Все полученные значения водоотдачи приводятся к объемным величинам и суммируются, что дает величину W_t поступления тало-дождевой воды на поверхность водосбора (в м^3/с).

Если в речном бассейне имеются ледники, то расчет слоя стаявшего за сутки льда h_l осуществляется по среднесуточной температуре воздуха с использованием коэффициента стаивания K_l : $h_l = K_l \cdot \theta$.

Найденные значения тало-дождевого и ледникового поступления используются для расчета значений расходов воды в замыкающем створе горного водосбора. Используется следующая схема расчетов.

Разработка на основе описанной расчетной схемы метода краткосрочного прогноза расходов воды в замыкающем створе горного водосбора предполагает использование информации о фактическом значении расхода воды на момент времени t (t-е сутки) выпуска прогноза. Вместо значений расходов воды более удобным является использование ошибки

расчета $\delta_t = Q_t - Q_{C,t}$. Практика показывает, что временной ход ошибки расчета имеет заметную систематическую составляющую. Это позволяет определить зависимость

$$\delta_{t+\Delta} = f\left(\frac{\sum_{\tau=t-T_\Delta+1}^{t}\delta_\tau}{T_\Delta}\right),$$

где Δ – заблаговременность прогноза в сутках; T_Δ – параметр.

С достаточной точностью эту зависимость можно считать линейной:

$$\delta_{t+\Delta} = a_\Delta\left(\frac{\sum_{\tau=t-T_\Delta+1}^{t}\delta_\tau}{T_\Delta}\right)$$

где a_Δ – параметр.

Процедура учета информации о фактическом значении расхода воды обычно именуется «коррекцией рассчитанных значений». Параметры a_Δ и T_Δ далее будут упоминаться как «параметры коррекции». Их значения определяются из условия наилучшего соответствия фактических и прогнозных значений расхода воды. После того, как были определены оптимальные значения параметров расчета, выполнялось определение значений параметров коррекции. Параметры коррекции находились для трех значений заблаговременности прогноза: 1, 2 и 3 суток. Минимум критерия качества определялся путем перебора заранее заданных множеств значений параметров коррекции.

Приведенные методы прогнозирования (физико-статистический и концептуальный) использованы для расчета и выпуска краткосрочных прогнозов на реках бассейна Кубани. Концептуальный подход использован для расчета расходов воды и выпуска прогнозов на небольших горных водосборах притоков р. Кубани (рис. 2). По физико-статистическим зависимостям выпускаются прогнозы для створов, расположенных как на самой Кубани, так и на ее притоках.

Оперативные испытания системы краткосрочных прогнозов расхода (уровня) воды

В настоящий момент оперативная система выпуска краткосрочных расходов воды на реках бассейна Кубани работает в тестовом режиме и настроена на выпуск краткосрочных прогнозов расходов воды на 18 гидрологических створах бассейна р. Кубани. Список створов с использованной моделью приведен в табл. 1, их расположение представлено на

рис. 2. В таблице указан метод, используемый для выпуска прогнозов, а также наибольшая заблаговременность прогноза расходов воды. В настоящий момент выпуск прогнозов осуществляется с временным шагом одни сутки.

Таблица 1

Гидрологические створы бассейна р. Кубани, для которых в системе автоматизированного прогнозирования выпускаются прогнозы расхода воды

Индекс	Река - створ	Метод	Заблаговременность прогноза, ч
83202	Учкулан–В.Учкулан	км	72
83207	Уллукам–Хурзук	км, фсм	72
83214	Теберда–Теберда	км	72
83236	Маруха–Маруха	км, фсм	72
83249	Аксаут–Х.Греческое	км, фсм	72
83262	Б.Зеленчук–Архыз	км	72
83266	Б.Зеленчук–Зеленчукская	фсм	72
83286	Уруп–Удобная	км, фсм	72
83318	М.Лаба–Бурное	км, фсм	72
83323	Б.Лаба–ниже А.моста	км	72
83333	Чамлык–Вознесенская	км	72
83338	Фарс–Дондуковская	км	72
83314	Лаба–Догужиев	фсм	48
83137	Кубань–К.Хетагурова	фсм	24
83150	Кубань–Дегтяревский	фсм	24
83157	Кубань–Успенское	фсм	24
83161	Кубань–Армавир	км, фсм	72
83174	Кубань–Ладожская	фсм	96

Примечание: «км» – концептуальная модель формирования стока на водосборе; «фсм» – физико-статистическая модель

Разработанные методы прогноза были проверены в оперативном режиме в период с апреля 2012 г. по январь 2013 года. Качество прогнозов оценивалось по отношению среднеквадратической ошибки прогноза S к среднеквадратическому отклонению прогнозируемой величины σ. Напомним, что точность методики считается удовлетворительной, когда величина S/σ принимает значения в диапазоне 0,51–0,80, и хорошей, если величина S/σ принимает значения менее 0,50. В данной статье будут приведены критерии качества прогнозов расхода воды, выпущенного с использованием концептуальной модели формирования стока, по наблюденным метеорологическим данным (расчетный режим), а также по прогностическим метеорологическим данным четырех используемых моделей атмосферы (оперативный прогностический режим). Оперативные

испытания физико-статистических зависимостей приводятся в статье [10]. В табл. 2 помещены критерии качества расчета расходов воды на основе наблюденной гидрометеорологической информации.

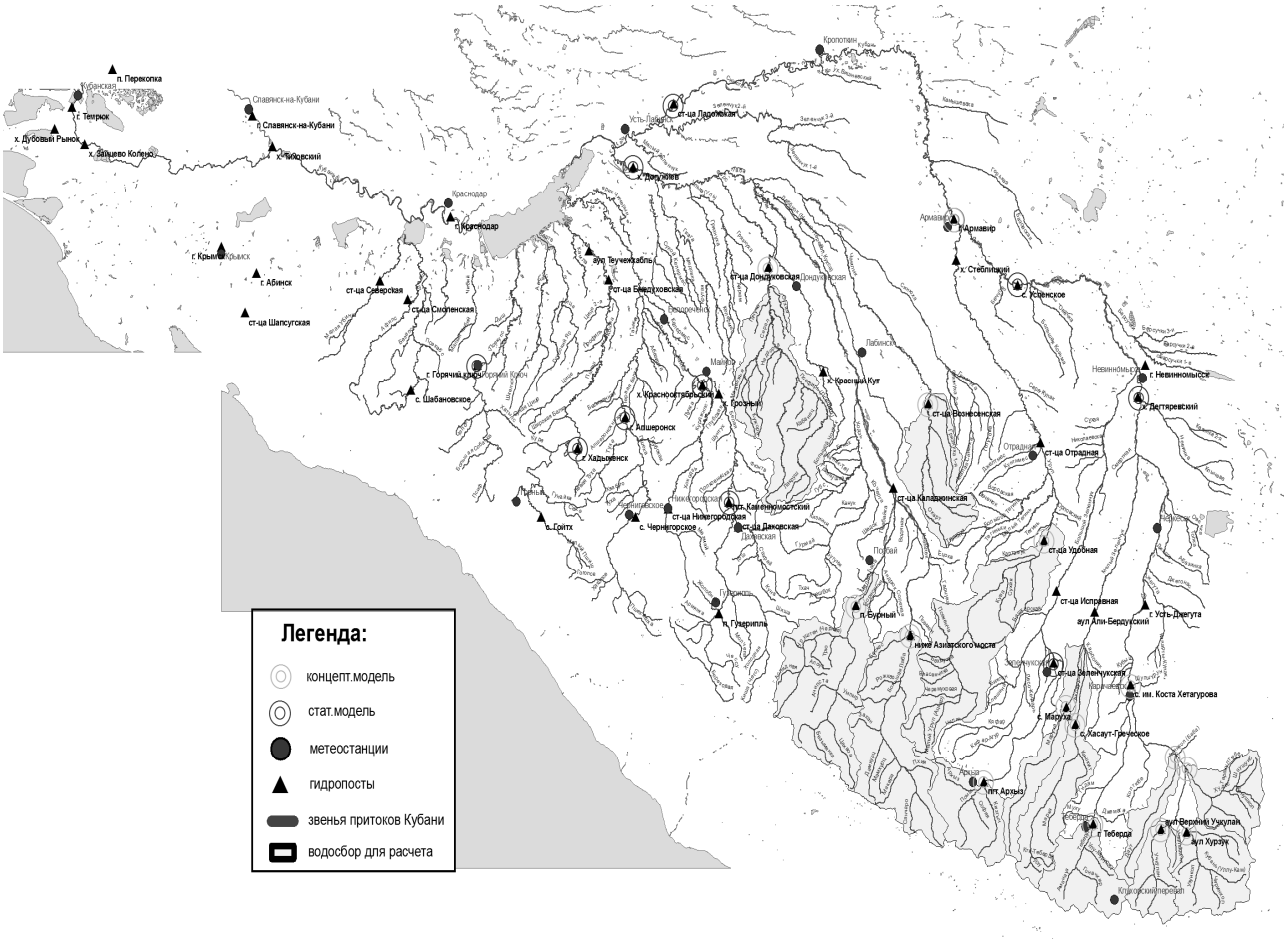

Рис. 2. Гидрологические посты бассейна р. Кубани, для которых разработана методика прогноза (основанная на концептуальном моделировании формирования стока и физико-статистических зависимостях).

Представленные в табл. 2 результаты расчета расхода воды для створов р. Кубани и ее притоков позволяют сделать следующие выводы. Значительные величины (значительно превышающие пороговое значение 0,80) критерия качества для четырех створов: Уруп–Удобная, М.Лаба–Бурное, Чамлык–Вознесенская и Фарс–-Дондуковская. Неудовлетворительное качество расчета расхода воды характерно для данных створов для трех заблаговременностей (1, 2, 3 суток). Значительное несоответствие наблюденных и рассчитанных расходов воды для данных четырех створов объясняется отсутствием

метеорологических наблюдений в пределах указанных водосборов (рис. 1, 2). Для составления методики для данных водосборов были выбраны комбинации метеорологических наблюдений на метеорологических станциях соседних водосборов (см. раздел «Информационное обеспечение прогнозов»). Известно, что распределение метеорологических элементов, особенно осадков, на территории бассейна Кубани очень сложное. Сложная система разнонаправленных и разновысотных хребтов в бассейнах притоков р. Кубани оказывает значительное влияние на распределение осадков [9]. Положение хребтов по отношению к влагонесущим воздушным потокам, абсолютные высоты хребтов, углы наклона их склонов, наличие горных котловин – все эти условия определяют режим увлажненности склонов и водосбора в целом. В связи с этим комбинация осадков и температур воздуха с соседних водосборов, отличающихся другими морфологическими условиями, и использование их в качестве входа в модель не привела к положительному эффекту. Методика для водосборов Уруп–Удобная, М.Лаба–Бурное, Чамлык-–Вознесенская и Фарс–Дондуковская в настоящий момент не позволяет производить расчет прогнозов расхода воды в связи с отсутствием метеорологических наблюдений на их территории.

Таблица 2

Показатель успешности (*S/σ*) расчета расхода воды на створах бассейна р. Кубани концептуальной моделью (апрель 2012–январь 2013 г.)

Индекс	Река - створ	Заблаговременность расчета, сутки		
		1	2	3
83202	Учкулан–В.Учкулан	0,28	0,30	0,34
83207	Уллукам–Хурзук	0,35	0,45	0,46
83214	Теберда–Теберда	0,34	0,40	0,38
83236	Маруха–Маруха	0,74	0,92	0,93
83249	Аксаут–Х.Греческое	0,59	0,55	0,61
83262	Б.Зеленчук–Архыз	0,71	0,77	0,87
83286	Уруп–Удобная	3,76	4,49	4,57
83318	М.Лаба–Бурное	1,43	1,70	1,82
83323	Б.Лаба–ниже А.моста	0,47	0,62	0,72
83333	Чамлык–Вознесенская	1,00	0,96	1,00
83338	Фарс–Дондуковская	1,13	1,28	1,29
83161	Кубань–Армавир	0,52	0,63	0,69

Для остальных гидрологических створов рассматриваемой реки, представленных в табл. 2, методика прогноза расхода воды по фактическим метеоданным с

заблаговременностью 1 сутки имеет хорошую и удовлетворительную точность – значение критерия качества для данных створов не превышает величины 0,74. Стоит отметить высокую сходимость фактических и рассчитанных расходов воды для верхних водосборов Кубани – рек Уллукам, Учкулан, Теберда – для них критерий качества принял значения менее 0,35.

В соответствии со значениями критерия качества для заблаговременностей 2 и 3 суток (табл. 2), методика расчета расхода воды для большинства гидрологических створов демонстрирует хорошее и удовлетворительное качество ($S/\sigma < 0,77$). Исключение составляют створы: Маруха–Маруха (для заблаговременности 2 и 3 суток) и Б.Зеленчук–Архыз для заблаговременности 3 суток.

Таблица 3

Показатель успешности (S/σ) прогноза расхода воды на створах бассейна р. Кубани с заблаговременностью 1 сутки (апрель 2012–январь 2013 г.)

Индекс	Река – створ	Метеорологическая модель			
		COSMO	NCEP	REGION	UKMO
83202	Учкулан–В.Учкулан	0,34	0,31	0,34	0,33
83207	Уллукам–Хурзук	0,4	0,35	0,39	0,38
83214	Теберда–Теберда	0,25	0,39	0,28	0,45
83236	Маруха–Маруха	0,73	0,71	0,72	0,72
83249	Аксаут–Х.Греческое	0,5	0,48	0,5	0,49
83262	Б.Зеленчук–Архыз	0,81	0,75	0,79	0,73
83323	Б.Лаба–ниже А.моста	0,64	0,63	0,69	0,61
83161	Кубань–Армавир	0,56	0,55	0,57	0,56

Таблица 4

Показатель успешности (S/σ) прогноза расхода воды на створах бассейна р. Кубани с заблаговременностью 2 суток (апрель 2012–январь 2013 г.)

Индекс	Река – створ	Метеорологическая модель			
		COSMO	NCEP	REGION	UKMO
83202	Учкулан–В.Учкулан	0,45	0,49	0,59	0,5
83207	Уллукам–Хурзук	0,56	0,.58	0,62	0,59
83214	Теберда–Теберда	0,28	1,27	1,49	0,54
83236	Маруха–Маруха	0,92	0,89	0,93	0,93
83249	Аксаут–Х.Греческое	0,63	0,6	0,66	0,61
83262	Б.Зеленчук–Архыз	0,87	0,81	0,89	0,81
83323	Б.Лаба–ниже А.моста	0,69	0,66	0,77	0,72
83161	Кубань–Армавир	0,62	0,59	0,60	0,60

Таблица 5

Показатель успешности (*S/σ*) прогноза расхода воды на створах бассейна р. Кубань с заблаговременностью 3 суток (апрель 2012–январь 2013 г.)

Индекс	Река – створ	Метеорологическая модель		
		COSMO	NCEP	UKMO
83202	Учкулан–В.Учкулан	0,51	0,46	0,51
83207	Уллукам–Хурзук	0,64	0,57	0,59
83214	Теберда–Теберда	0,28	0,57	0,97
83236	Маруха–Маруха	0,94	0,92	0,96
83249	Аксаут–Х.Греческое	0,68	0,62	0,64
83262	Б.Зеленчук–Архыз	0,93	0,83	0,85
83323	Б.Лаба–ниже А.моста	0,69	0,63	0,70
83161	Кубань–Армавир	0,67	0,62	0,64

В табл. 3–5 приведены значения оперативного прогноза расхода воды для заблаговременностей 1–3 суток, рассчитанные с помощью концептуальной модели и метеорологического прогноза четырех моделей атмосферы. Данные представлены для 8 гидрологических створов р. Кубани и ее притоков, для которых методика показала хорошее и удовлетворительное качество расчета расхода воды (табл. 2). В табл. 3 представлены данные для трех моделей атмосферы, поскольку максимальная заблаговременность метеорологического прогноза модели REGION в настоящий момент составляет 48 ч.

Прогноз расхода воды с заблаговременностью 1 сутки для створов бассейна р. Кубани, приведенных в табл. 3, по прогностическим метеорологическим данным всех используемых моделей атмосферы является хорошим и удовлетворительным. Величины критерия качества не превышают критическое значение 0,8 (0,81 для створа Б.Зеленчук–Архыз). Качество прогнозов расхода воды по метеорологическим данным метеомоделей примерно на одном уровне, лишь для гидрологического створа Теберда-Теберда критерий качества несколько хуже для прогнозов по данным моделей NCEP и UKMO.

Качество прогнозов расхода воды с заблаговременностью 2 и 3 суток является хорошим и удовлетворительным для гидрологических створов Учкулан–В.Учкулан, Уллукам–Хурзук, Аксаут–Х.Греческое, Б.Лаба–ниже А.моста, Кубань–Армавир при использовании метеорологического прогноза всех четырех моделей (табл. 4–5). Для водосбора Теберда–Теберда хорошая точность прогноза расхода воды с заблаговременностью 2 суток достигается с использованием метеопрогнозов моделей атмосферы COSMO и UKMO (критерий качества принимает значения 0,28 и 0,54, соответственно), а для заблаговременности 3 суток – с использованием метеопрогнозов моделей атмосферы COSMO и NCEP (критерий качества принимает значения 0,28 и 0,57, соответственно). Прогноз для данного створа с другими метеорологическими

прогностическими данными для заблаговременностей 2 и 3 суток не удовлетворяет требованиям по точности. Точность прогноза расхода воды с заблаговременностью 2 и 3 суток для створов Маруха–Маруха и Б.Зеленчук-Архыз неудовлетворительная.

Приведенные в табл. 3–5 данные свидетельствуют о том, что для большинства гидрологических створов разработанная методика может быть признана успешной с заблаговременностью до 3 суток. В то же время для створов Маруха–Маруха и Б.Зеленчук–Архыз она является удовлетворительной. Стоит отметить, что приведенные результаты относятся к оперативному варианту системы прогнозирования, работающей с корректировкой прогностических расходов воды. Необходимым условием для такого уровня качества прогноза является непрерывное поступление данных расходов воды с гидрологических постов бассейна в оперативную базу данных Гидрометцентра России.

Структура автоматизированной системы прогнозов

Автоматизация процесса выпуска краткосрочных прогнозов расходов (уровней) воды на реках бассейна Кубани разработана в операционной среде Linux (SuSe Linux) с использованием языков программирования Python (версия 2.6) и Fortran90, а также языка командной оболочки Korn Shell (ksh). Использован функционал стандартной библиотеки Python, а также дополнительных модулей NumPy, SciPy и Pandas [17]. На языке Python сформирован сценарий автоматизированного расчета и выпуска прогнозов для рек бассейна Кубани «OPER_KUB», а также модули первичной обработки гидрометеорологической информации и постобработки гидрологических прогнозов. Система краткосрочного прогноза расходов воды на реках бассейна Кубани включает в себя следующие структурные компоненты (рис. 3):

- блок подготовки исходных данных для выпуска краткосрочных гидрологических прогнозов, содержащий модули чтения данных из оперативной базы данных RIVR (обращение к макетам данных наблюдений SYNOPKUB, HYDROKUB, а также к макетам метеорологического прогноза RGINTKUB, LNINTKUB, NCINTKUB и EKINTKUB), модуль проверки и подготовки данных для расчетного интервала времени (24 часа), модуль распределения метеорологических факторов (приземной температуры воздуха и сумм осадков) по высотным зонам горных водосборов притоков Кубани;
- блок расчета и прогноза расходов воды для горных водосборов бассейна, который содержит модуль расчета расходов воды по концептуальной гидрологической модели на основе фактической метеорологической информации и модуль прогнозов на основе прогностических полей метеорологических моделей;

- блок прогноза расходов воды на основе физико-статистических зависимостей;
- блок постобработки гидрологических прогнозов, включающий модуль обработки результирующих файлов с целью их последующей визуализации в ГИС, распространения по сети Интернет и размещения в оперативную базу Гидрометцентра России.

В первую очередь производится выборка наблюденных данных о температуре воздуха, осадках с сети синоптических станций, а также данных об уровне и расходе воды с сети гидрологических постов бассейна р. Кубани из оперативной базы данных RIVR (рис. 2). С этой целью сценарий обращается к программам dwnld_mo.out, dwnld_ho.out и dwnld_mf.out, сформированным на языке Fortran90. Программы выполняют обращение к макетам оперативной базы данных RIVR, содержащих данные метеорологических и

Рис. 3. Схема автоматизированной системы краткосрочных гидрологических прогнозов для рек бассейна Кубани.

гидрологических наблюдений: SYNOPKUB, HYDROKUB соответственно. Далее программы обращаются к макетам RGINTKUB, LNINTKUB, NCINTKUB и EKINTKUB, содержащим данные метеорологических прогнозов моделей REGION, COSMO, NCEP и UKMO, интерполированных в точки метеорологических станций бассейна Кубани. Обращение к

удаленной базе происходит со следующими аргументами: элемент, даты загрузки, регион, файл с индексами метеорологических станций (гидрологических постов). В результате работы программы выборки данных формируются 12 текстовых файлов (формат CSV, разделитель – точка с запятой):

- 4 файла содержат данные наблюдений наземной сети метеорологических станций и гидрологических постов (температура воздуха, сумма атмосферных осадков, расход и уровень воды);
- 8 файлов, содержащих метеорологический прогноз температуры воздуха и суммы осадков по четырем используемым моделям (выбирается последний поступивший прогноз в базу RIVR).

После выборки данных сценарий KUB_OPER переходит к этапу обработки исходных данных. Программы обработки данных fact_prep.py и mf_prep.py сформированы на языке Python. Данные программы производят контроль качества исходной информации, заполнение пропусков, а также приведение данных к расчетным интервалам времени. В настоящий момент расчетный интервал времени составляет 24 ч (календарные сутки МСК). Далее программа выполняет распределение метеорологических величин по высотным зонам расчетных водосборов в соответствии с алгоритмом, описанным выше (см раздел «Использованные модели»). В результате работы формируются 12 текстовых файлов с проверенными и приведенными в требуемый вид исходными гидрометеорологическими данными, а также с приведенными к высотным зонам значениями фактических и прогностических метеорологических величин.

Выпуск краткосрочного прогноза расходов воды для гидрологических постов бассейна Кубани осуществляется в 21–10 ч МСК. Этому предшествует процедура расчета начальных условий для выпуска прогноза, которая заключается в расчете расходов воды с помощью концептуальной модели с максимально полным объемом синоптической и гидрологической информации, имеющейся на текущий момент времени. В ходе расчета расхода воды с помощью концептуальной модели формируются необходимые переменные состояния модели для пространственных элементов горных водосборов (ландшафтная часть высотной зоны) на дату выпуска прогноза:

- переменные модели динамики снежного покрова;
- переменные, характеризующие содержание талой, дождевой и ледниковой влаги;
- переменные коррекции рассчитанных значений расхода воды.

Вышеуказанные данные являются начальными условиями для выпуска прогноза расходов воды на реках Кубани. С учетом обновленных переменных состояния и метеорологического прогноза производится расчет прогноза расходов воды. Прогноз

считается с заблаговременностью до 72 часов (шаг по времени 24 ч). Модель формирования стока оформлена в виде программы на языке Fortran 90.

Прогноз по физико-статистическим зависимостям формируется сразу после расчета прогноза с помощью концептуальной модели формирования стока на водосборе.

В заключительной части сценарий «OPER_KUB» обращается к программам, выполняющим постобработку рассчитанных прогнозов расхода воды. В постобработку в настоящий момент входят такие процедуры как отбор файлов с прогнозом, их форматирование с целью рассылки потребителям прогнозов по сети Интернет. Также производится подготовка прогностических данных для их визуализации в среде ГИС. Размещение в оперативную базу данных Гидрометцентра России и их визуализация на интернет-сайте Гидрометцентра России является одной из первостепенных задач в области постобработки результатов прогнозов на данный момент.

Сценарий «OPER_KUB» установлен на персональной ЭВМ, находящейся в локальной сети ФГБУ «Гидрометцентр России», а также имеющей доступ к удаленной оперативной базе данных RIVR.

Заключение

Автоматизированная система краткосрочного прогноза расхода воды на реках бассейна Кубани функционирует в тестовом режиме в ФГБУ «Гидрометцентр России». Прогнозы выпускаются ежедневно для 18 гидрологических створов бассейна с заблаговременностью до трех суток при шаге прогнозирования, равном одним суткам. Методическую основу прогнозирования составляют набор физико-статистических зависимостей и модель формирования стока в горном водосборе.

Анализ точности методики прогнозов расхода воды на основе концептуальной модели процессов формирования стока на водосборе показал, что для ряда горных водосборов ее использование обосновано и позволяет осуществлять выпуск прогнозов расхода воды до 3 суток с хорошей и удовлетворительной точностью.

Для некоторых горных водосборов особо остро стоит проблема отсутствия метеорологических наблюдений, что выражается в неудовлетворительном качестве расчета и прогноза расхода воды в их замыкающих створах. Расширение сети гидрометеорологических наблюдений в бассейне Кубани позволит улучшить структуру описания влияния метеорологических характеристик на процессы, происходящие на поверхности горных водосборов, и тем самым улучшить качество расчета и прогноза расхода воды в замыкающих створах.

В настоящий момент используются данные, измеряемые на метеорологических станциях и гидрологических постах в стандартные сроки. Усвоение системой прогнозирования информации учащенных наблюдений автоматизированных метеорологических станций и гидрологических постов позволит использовать более детальную модель формирования стока, а также перейти к расчетам с меньшим шагом по времени, соответствующим временным характеристикам формирования и прохождения паводков на реках бассейна Кубани.

Список использованных источников

1. *Алексеева А.А., Лосев В.М.. Багров А.Н.* Результаты испытания автоматизированного метода прогноза осадков с детализацией интенсивности в трех градациях (от 11 до 34, от 35 до 49, 50 мм/12 ч и более) на основе выходных данных региональной модели с заблаговременностью 12 и 24 ч // Информационный сборник № 39. – 2012. – С. 49–60.

2. *Арефьева О.Н., Полунин А.Я.* Алгоритм идентификации параметров распределения осадков и температуры воздуха в горном водосборе // Труды Гидрометцентра СССР. – 1989. – Вып. 309. – С. 57–67.

3. *Багров А.Н.* Сравнительная оценка успешности прогнозов элементов погоды на основе ряда отечественных моделей и зарубежных моделей атмосферы различного масштаба // Информационный сборник № 39. – 2012. – С. 69–79.

4. *Бельчиков В.А., Борщ С.В., Мухин В.М., Полунин А.Я.* Опасные паводки в бассейне р. Кубань и методы их прогнозирования // 80 лет Гидрометцентру России. – М.: Триада, лтд, 2010. – С. 401–422.

5. *Борщ С.В., Асарин А.Е., Болгов М.В., Полунин А.Я.* Наводнения // Методы оценки последствий изменения климата для физических и биологических систем. – М.: 2012 – С. 87–125.

6. *Вильфанд Р.М., Ривин Г.С., Розинкина И.А.* Мезомасштабный краткосрочный прогноз погоды в Гидрометцентре России на примере COSMO-RU // Метеорология и гидрология. – 2010. – № 1. – С. 5–17.

7. *Доброумов Б.М., Тумановская С.М.* Наводнения на реках России: их формирование и районирование // Метеорология и гидрология. – 2002. – № 12. – С. 70–78.

8. *Лосев В.М.* Региональная гидродинамическая модель Гидрометцентра России // 80 лет Гидрометцентру России. – М.: Триада, лтд, 2010. – С. 36–58.

9. *Лурье П.М., Панов В.Д., Ткаченко Ю.Ю.* Река Кубань: гидрография и режим стока. – СПб: Гидрометеоиздат, 2005. – 498 с.

10. *Мухин В.М.* Методические основы физико-статистических видов краткосрочных прогнозов стока горных рек. – см. настоящий сборник.

11. *Мухин В.М., Федорова Ю.В.* Эмпирические методы прогноза быстроразвивающихся паводков на некоторых притоках Кубани // Труды Гидрометцентра России. – 2006. – Вып. 341. – С. 79–103.

12. *Полунин А.Я.* О моделировании процесса поступления воды на водосбор для краткосрочных прогнозов стока // Труды Гидрометцентра СССР. – 1990. – Вып. 295. – С. 69–79.

13. *Ривин Г.С., Розинкина И.А., Блинов Д.В.* Технологическая линия системы краткосрочных мезомасштабных оперативных прогнозов погоды COSMO-RU с шагом сетки 7 км // Труды Гидрометцентра России. – 2012. – С. 61–81.

14. *Ривин Г.С., Розинкина И.А., Багров А.Н., Блинов Д.В.* Мезомасштабная модель COSMO-RU07 и результаты ее оперативных испытаний // Информационный сборник № 39. – 2012. – С. 15–48.

15. *Степанов Ю.А., Жабина И.И.* АСООИ-XEON4 – многомашинная оперативная автоматизированная технология ГУ «Гидрометцентр России», предназначенная для информационного обеспечения регламентированного счета и формирования продукции различных прогностических моделей // 80 лет Гидрометцентру России. – М.: Триада, лтд, 2010. – С. 435–452.

16. *Шакина Н.П., Скриптунова Е.Н., Иванова А.Р., Горлач И.А.* Динамическая верификация численных моделей: анализ модельных механизмов генерации вертикальных движений и осадков // 80 лет Гидрометцентру России. – М.: Триада, лтд, 2010. – С. 289–312.

17. *Wes McKinney at al.* Pandas: powerful Python data analysis toolkit. – Release 0.9.2.dev-61766ec. – 2012. – November 20. – 392 p.

Поступила в редакцию 09.04.2013 г.