

УДК 556.06

## ДОЛГОСРОЧНЫЙ АНСАМБЛЕВЫЙ ПРОГНОЗ ВЕСЕННЕГО ПРИТОКА ВОДЫ В ЧЕБОКСАРСКОЕ ВОДОХРАНИЛИЩЕ НА ОСНОВЕ ГИДРОЛОГИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ: РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОВЕРОЧНЫХ И ОПЕРАТИВНЫХ ИСПЫТАНИЙ

*С.В. Борщ<sup>1</sup>, А.Н. Гельфан<sup>2</sup>, В.М. Морейдо<sup>2</sup>,  
Ю.Г. Мотовилов<sup>2</sup>, Ю.А. Симонов<sup>1</sup>*

*<sup>1</sup> Гидрометеорологический научно-исследовательский центр  
Российской Федерации, г. Москва;*

*<sup>2</sup> Институт водных проблем РАН, г. Москва  
borsch@mecom.ru, hydrowpi@iwp.ru, vsevolod.moreydo@iwp.ru,  
motol49@yandex.ru, simonov@mecom.ru*

Исследуется возможность использования гидрологической модели, созданной на базе информационно-моделирующего комплекса ECOMAG, для оперативного долгосрочного (с заблаговременностью 3–4 месяца) ансамблевого прогноза незарегулированного притока воды в Чебоксарское водохранилище в период весеннего половодья. Представлены результаты проверочных прогнозов притока воды в водохранилище за 35-летний период (1982–2016 гг.) и показано, что предложенная схема позволила с удовлетворительной точностью спрогнозировать объем и максимальный приток воды в водохранилище, а также число дней с расходами воды выше среднемноголетнего максимального значения. В статье представлены результаты оперативного испытания схемы прогноза в период половодья 2017 года. Обсуждаются возможности повышения качества прогноза путем усвоения моделью натуральных данных о притоке воды в водохранилище и запасах воды в снежном покрове на дату выпуска прогноза, а также данных метеорологического прогноза.

*Ключевые слова:* долгосрочные гидрологические прогнозы, гидрологическое моделирование, прогноз притока воды к водохранилищам, Чебоксарское водохранилище.

### Введение

Совершенствование методов управления водными ресурсными системами для оптимизации водопользования, а также защиты населения и объектов экономики от наводнений в существенной степени зависит от возможностей повышения точности и заблаговременности долгосрочных прогнозов характеристик весеннего притока воды в водохранилища. Реализация указанных возможностей особенно актуальна для водохранилищ Волжско-Камского каскада – одной из крупнейших в мире водных систем комплексного назначения. Главной задачей каскада является перераспределение во времени крайне неравномерно распределенного

внутри года стока р. Волги, когда в период весеннего половодья, продолжающегося 2–3 месяца, по реке проходит 2/3 годового объема стока.

Осуществление пропуска весеннего половодья через гидроузлы каскада за последние два десятилетия осложнилось в связи с неконтролируемой застройкой нижних бьефов гидроузлов каскада. С другой стороны, фактическое сокращение регулирующей способности каскада водохранилищ из-за ограничений по предполоводной сработке водохранилищ по рыбохозяйственным требованиям ведет к необходимости повышения максимальных расходов через гидроузлы в период весеннего половодья. В этой связи для лиц, принимающих решения по пропуску половодья, особенно важно получение с наибольшей возможной заблаговременностью надежной информации о возможном режиме весеннего притока воды в водохранилища.

Принятые в настоящее время в отечественной оперативной практике методы долгосрочного прогноза объема весеннего притока воды в водохранилища Волжско-Камского каскада основаны на соотношениях между объемом талого стока и набором показателей, отражающих состояние водосбора перед снеготаянием: запасами воды в снеге, глубиной промерзания почвы и показателями ее увлажненности.

В качестве расчетных соотношений используются, как правило, физико-статистические зависимости, учитывающие, в определенной мере, представления о формировании потерь талого стока либо линейные уравнения множественной регрессии [6]. Осадки за период заблаговременности прогноза, величина которых входит в качестве предиктора в прогнозную методику, при расчете прогноза в оперативном режиме задаются как их климатическая норма.

Долгосрочный прогноз максимального расхода весеннего половодья рассчитывается по спрогнозированному объему стока на основе связи между этими величинами, построенной по данным наблюдений за предшествующие годы. Поскольку максимальный расход талого стока в большей степени зависит от метеорологических условий в период заблаговременности прогноза и в меньшей степени от начальных условий, прогноз максимального расхода заметно уступает в точности прогнозу объема талого стока.

Усиление требований к экономической эффективности и безопасности эксплуатации водноресурсных систем обуславливает необходимость привлечения дополнительных, к уже существующим, источников прогнозической информации о характеристиках водного режима. Одним из возможных решений проблемы совершенствования методов долгосрочного прогнозирования с целью повышения его качества, надежности, увеличения информативности прогнозов может быть использование физико-математических моделей формирования речного стока (здесь и далее мы будем использовать термин «гидрологические модели»), описывающих гидрологический цикл бассейна реки (или водохранилища) с

использованием доступных данных метеорологических наблюдений, данных дистанционного зондирования земной поверхности, информации о природных особенностях бассейна.

Применение гидрологических моделей позволяет получить прогноз не только объема и максимального расхода стока, но и других характеристик водного режима, что дает дополнительную информацию для принятия решений, связанных с пропуском половодья через гидроузлы, и дает дополнительные возможности повышения экономической эффективности использования прогнозов.

Такой подход позволяет также перейти от традиционных детерминистических к ансамблевым прогнозам, результаты которых могут быть представлены как в детерминистической, так и в вероятностной форме с учетом различных источников ошибок прогнозов. Ансамблевый гидрологический прогноз позволяет разработать более гибкий режим управления водноресурсными системами, так как дает возможность оценить степень риска при вероятных ошибках прогноза.

Совершенствование «методов выпуска гидрометеорологических долгосрочных прогнозов (месяц, сезон), а также прогнозов экстремальных гидрометеорологических явлений и характеристик, обладающих большой степенью неопределенности, в вероятностной форме» признано российским профессиональным сообществом одной из приоритетных задач научных гидрологических исследований [5].

Цель настоящей статьи – исследование возможностей применения гидрологической модели для оперативного долгосрочного ансамблевого прогноза незарегулированного притока воды в Чебоксарское водохранилище в период весеннего половодья.

Статья построена следующим образом. В ее начале дан краткий обзор методов ансамблевого долгосрочного прогноза, разработанных за последние 10–15 лет. Затем описана используемая гидрологическая модель, требования к ее информационному обеспечению и приведены результаты испытания модели по данным стандартного гидрометеорологического мониторинга в бассейне Чебоксарского водохранилища. В третьем разделе описана методика долгосрочного прогноза гидрографа притока воды в водохранилище и задания ансамбля метеорологических условий за период заблаговременности прогноза.

Основное содержание статьи посвящено результатам верификации предлагаемой прогностической методики по данным проверочных прогнозов притока воды в водохранилище за 2 квартал в течение 35-летнего периода (1982–2016 годы), а также результатам оперативного испытания схемы прогноза на примере половодья 2017 года. В заключительном разделе обсуждаются возможности разработанной прогностической методики как источника дополнительной информации при принятии управленческих решений, а также пути повышения качества прогноза.

## 1. Обзор методов ансамблевого долгосрочного прогноза сезонного стока

Существенный источник неопределенности долгосрочного прогноза речного стока – изменчивость метеорологических условий за период его заблаговременности. Методика ансамблевых гидрологических прогнозов ESP (Ensemble Streamflow Prediction), учитывающая этот источник неопределенности, разработана и применяется в Системе прогнозов речного стока Национальной службы погоды США (НСП) для выпуска долгосрочных (заблаговременностью от нескольких недель до нескольких месяцев) прогнозов речного стока. Согласно указанной методике, прогноз рассчитывается по гидрологической модели, на входе которой задается ансамбль временных рядов метеорологических переменных, описывающих возможные сценарии погоды за период заблаговременности прогноза [7]. В качестве такого ансамбля используются наблюдаемые за прошлые годы данные о метеорологических переменных. В результате прогностическая методика ESP позволяет получить ансамбль гидрографов стока, из которых могут быть получены прогнозы характеристик стока (объема стока, максимального расхода, продолжительности половодья и других), как в детерминистической, так и в вероятностной формах. Начальные условия для ансамблевых экспериментов задаются по данным о состоянии водосбора на дату выпуска прогноза (запас воды в снеге, влажность почвы, глубина ее промерзания). При этом используются либо данные наблюдений, либо значения соответствующих характеристик, рассчитанные по данным метеорологических наблюдений за предшествующий период.

С середины 2000-х годов методика ESP ансамблевых долгосрочных прогнозов стала применяться в Центрах прогнозов стока НСП США [11], в оперативной практике Канады [8], европейских стран [13]. Внедрение прогностической методики ESP в оперативную практику США и других стран было стимулировано, в значительной степени, недостаточной точностью традиционных регрессионных методик прогнозов [9].

В ИВП РАН в середине 2000-х годов проведены исследования возможностей построения ансамблевых долгосрочных прогнозов весеннего стока с помощью гидрологических моделей с распределенными параметрами на примере рек Вятка, Сосна и Сейм [2, 3, 10]. Предложен метод расчета вероятных сценариев погоды за период заблаговременности прогноза с помощью стохастических моделей («генераторов погоды»).

Следует подчеркнуть, что правильная интерпретация и практическое использование ансамблевых прогнозов требует специальной подготовки как специалистов, непосредственно выпускающих гидрологические прогнозы, так и пользователей этих прогнозов. Лица, принимающие решение на их основе, должны иметь достаточное представление о методологии, положенной в основу ансамблевого прогнозирования, об исходной информации, используемой гидрологической модели и методах оценки неопределенности, об особенностях решаемой задачи. Вместе с тем,

адекватный учет информации, содержащейся в ансамблевом прогнозе, создает возможность получить представление о риске принятия тех или иных управленческих решений – возможность, которая отсутствует при детерминистическом прогнозировании.

## **2. Гидрологическая модель притока воды в Чебоксарское водохранилище: структура, информационное обеспечение, результаты калибровки и проверки**

В качестве расчетного блока для долгосрочного прогноза весеннего половодья используется гидрологическая модель, созданная в ИВП РАН на базе информационно-моделирующего комплекса (ИМК) ЕСОМАГ<sup>1</sup>, разработанного Ю.Г. Мотовиловым [12].

Гидрологическая модель описывает процессы формирования и таяния снежного покрова, гидротермические процессы в почве при ее промерзании и оттаивании, инфильтрации воды в мерзлую и незамерзшую почву, испарения и эвапотранспирации, стекания воды по поверхности водосбора, подповерхностного и грунтового стока, движения воды в речной системе. Многочисленные примеры успешных испытаний ИМК ЕСОМАГ по данным наблюдений в речных бассейнах площадью от десятков до миллионов км<sup>2</sup>, расположенных в разных климатических условиях, даны, например, в библиографии к статье [4].

Для схематизации водосбора Чебоксарского водохранилища и задания параметров гидрологической модели использовались цифровые модели рельефа с разрешением 1 км и серии цифровых тематических карт (почвенная, ландшафтная и т. д.). В качестве граничных условий задавались ряды среднесуточных значений температуры и дефицита влажности воздуха, интенсивности осадков по данным наблюдений на 157 метеорологических станциях с 1.01.1982 по 31.07.2016. Расположение метеорологических станций и расчетные элементы гидрологической модели, построенные по данным о рельефе, показаны на рис. 1.

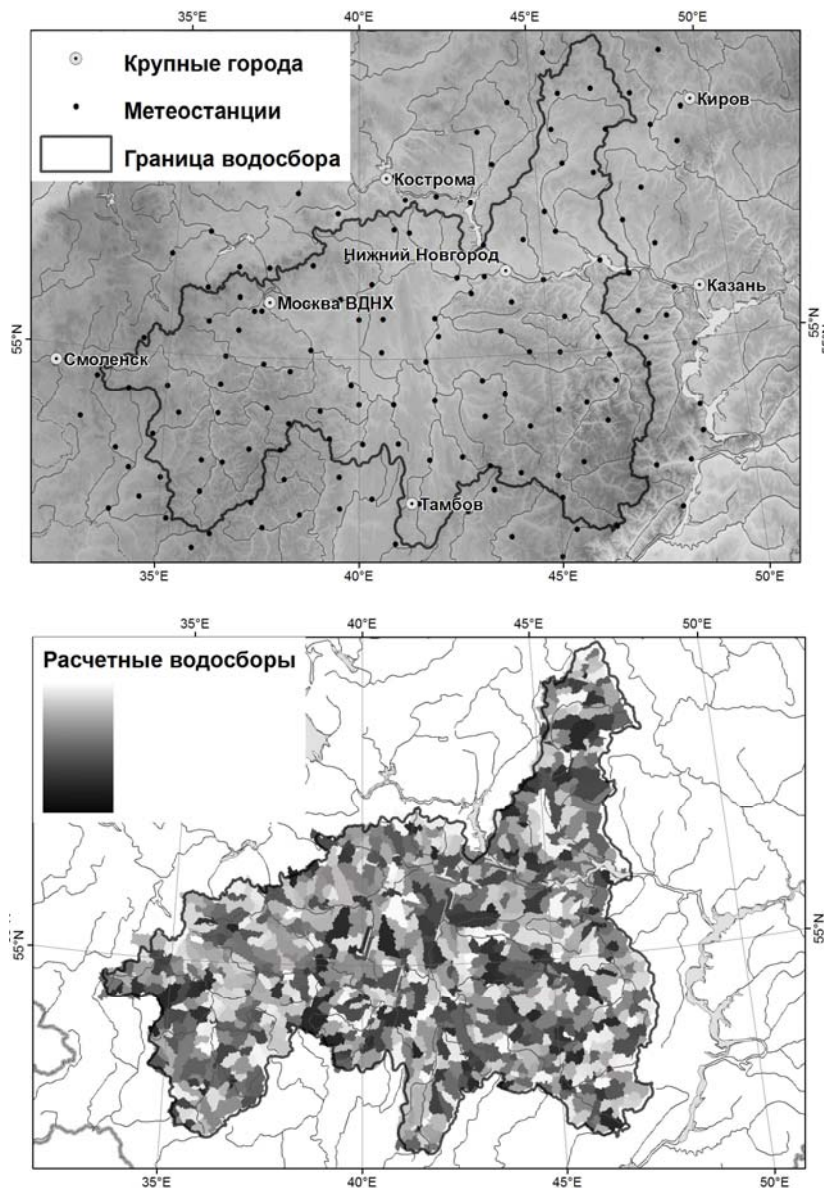
Гидрологическая модель позволяет по данным стандартных метеорологических наблюдений сети мониторинга Росгидромета рассчитать среднесуточные расходы притока воды в водохранилище за любой заданный период времени. Помимо притока воды в водохранилище модель позволяет рассчитать с пространственным разрешением порядка 300 км<sup>2</sup> и суточным разрешением по времени основные процессы формирования весеннего половодья.

Гидрологическая модель калибровалась и проверялась по данным о боковом притоке воды к Чебоксарскому водохранилищу за 35 лет – с начала его функционирования в 1982 году по 2016 год. Калибровка модели производилась по фактическим данным о притоке воды за период с

---

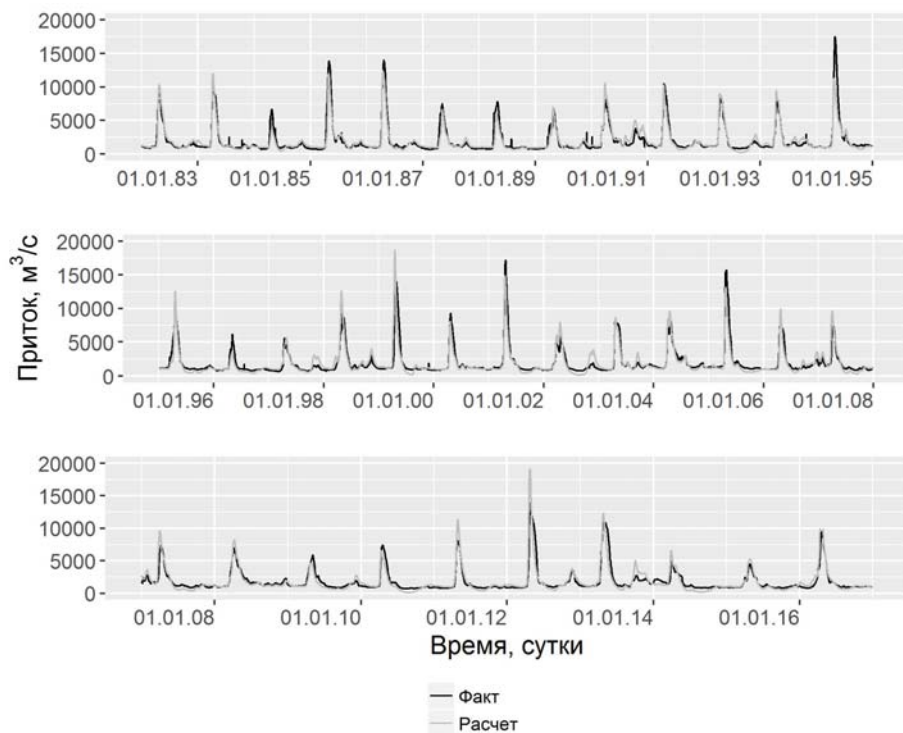
<sup>1</sup> Свидетельство о государственной регистрации в Роспатенте от 09.01.2013 №2013610703

2000 по 2014 годы; проверка модели на независимых данных производилась для периода 1982–1999 годы, а также за 2015 и 2016 годы.



**Рис. 1.** Расположение метеорологических станций (сверху), данные измерений которых использованы для построения гидрологической модели, и схематизация водосбора водохранилища (снизу).

Рассчитанные ежедневные расходы воды за весь период сравниваются с фактическими величинами на рис. 2.



**Рис. 2.** Фактический (черный) и рассчитанный (серый) гидрографы среднесуточного притока воды к Чебоксарскому водохранилищу.

Систематическая относительная погрешность расчета ежедневного притока воды в водохранилище за 35-летний период оказалась близка к нулю, среднеквадратическая погрешность расчетов составила порядка  $745 \text{ м}^3/\text{с}$  при стандартном отклонении фактических величин  $2100 \text{ м}^3/\text{с}$ . В табл. 1 приведены результаты расчетов характеристик притока воды к Чебоксарскому водохранилищу за 2 квартал для периодов калибровки и проверки гидрологической модели.

Полученные удовлетворительные результаты апробации модели по данным гидрометеорологических наблюдений дают основание использовать ее в качестве расчетного блока разрабатываемой схемы долгосрочного прогноза притока воды к водохранилищу.

### 3. Схема долгосрочного ансамблевого прогноза

Схема долгосрочного ансамблевого прогноза притока воды к водохранилищу состоит в последовательном применении следующих расчетных процедур:

1. По данным метеорологических наблюдений за предшествующий осенне-зимний период с помощью гидрологической модели рассчитываются характеристики водосбора (запасы воды в снежном покрове, глубина

промерзания и влажность почвы, запас воды в русловой сети и др.) на дату выпуска прогноза.

2. По данным наблюдений за 50 лет (1967–2016 гг.) для 157 метеорологических станций (см. рис. 1) строится ансамбль из  $N=50$  сценариев погоды – возможных метеорологических условий на период заблаговременности прогноза<sup>2</sup> (например, 1 апреля – 30 июня, если прогноз выпускается на 2 квартал).

**Таблица 1.** Расчет объема и максимального расхода притока воды в Чебоксарское водохранилище за 2 квартал с помощью гидрологической модели по данным метеорологических наблюдений

	Калибровка параметров (2000–2010)	Проверка на независимом материале (1982–1999; 2011–2016)	Весь период расчетов (1982–2016)
Объем притока $W_{II}$ , км <sup>3</sup>			
$W_{II}^{\text{модель}}$	32,6	32,9	32,8
$W_{II}^{\text{факт}}$	33,0	33,5	33,4
Систематическая погрешность расчета, %	-1	-2	-2
Максимальный расход $Q_{II}$ , м <sup>3</sup> /с			
$Q_{II}^{\text{модель}}$	8490	8895	8705
$Q_{II}^{\text{факт}}$	9219	9413	9351
Систематическая погрешность расчета, %	-8	-6	-7

3. По смоделированным начальным условиям на дату выпуска прогноза и сценариям погоды за период заблаговременности прогноза, задаваемым на входе гидрологической модели, рассчитывается ансамбль из 50-ти прогнозируемых гидрографов притока воды к водохранилищу.

4. По ансамблю 50 прогнозируемых гидрографов строятся соответствующие ансамбли следующих характеристик притока воды к водохранилищу за период заблаговременности прогноза: объема ( $W$ , км<sup>3</sup>), максимального расхода ( $Q_{\text{макс}}$ , м<sup>3</sup>/с), продолжительности периодов высокой водности ( $N_{Q_{\text{ср}}}$ , сут. – число дней с расходом воды выше нормы, 4250 м<sup>3</sup>/с,

<sup>2</sup> Под «сценарием метеорологических условий на период заблаговременности прогноза» здесь понимается совокупность временных рядов метеорологических величин, задаваемых на период заблаговременности с тем пространственно-временным разрешением, которое позволяет использовать эти ряды в качестве «входов» в гидрологическую модель для расчета гидрографа стока. Для используемой гидрологической модели это ряды суточных значений осадков, температуры и влажности воздуха, задаваемые в 157 точках водосбора.

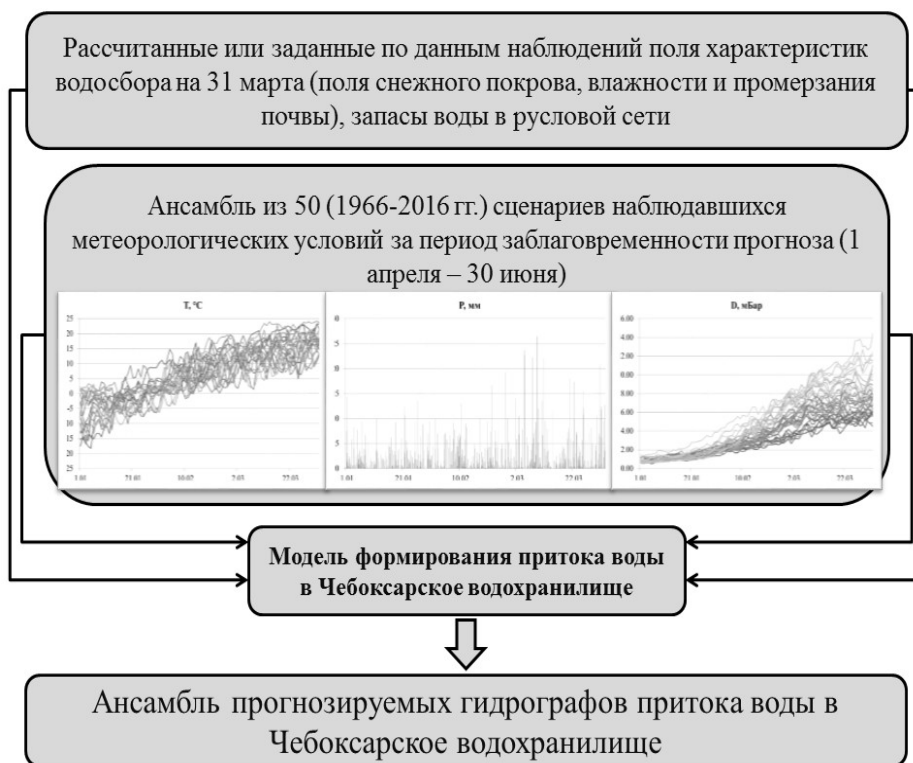


$N_{Q_{\max}}$ , сут.– число дней с расходом выше среднего максимального расхода,  $9355 \text{ м}^3/\text{с}$ ).

5. Строится детерминистический прогноз каждой из прогнозируемых характеристик притока воды к водохранилищу как среднее значение из ансамбля.

6. Строится вероятностный прогноз каждой из прогнозируемых характеристик притока воды к водохранилищу в виде функций распределения вероятности прогнозируемых величин и доверительных интервалов прогноза.

Схема прогноза показана на рис. 3.



**Рис. 3.** Схема долгосрочного ансамблевого прогноза притока воды к водохранилищу за 2 квартал.

На рис. 4 в качестве примера показан ансамбль прогнозируемых по описанной схеме гидрографов стока за период заблаговременности 1 марта – 31 мая 2009 года.

Ниже представлены результаты применения описанной схемы для построения проверочных прогнозов характеристик притока воды к Чебоксарскому водохранилищу за 35 сезонов (1982–2016 годы).

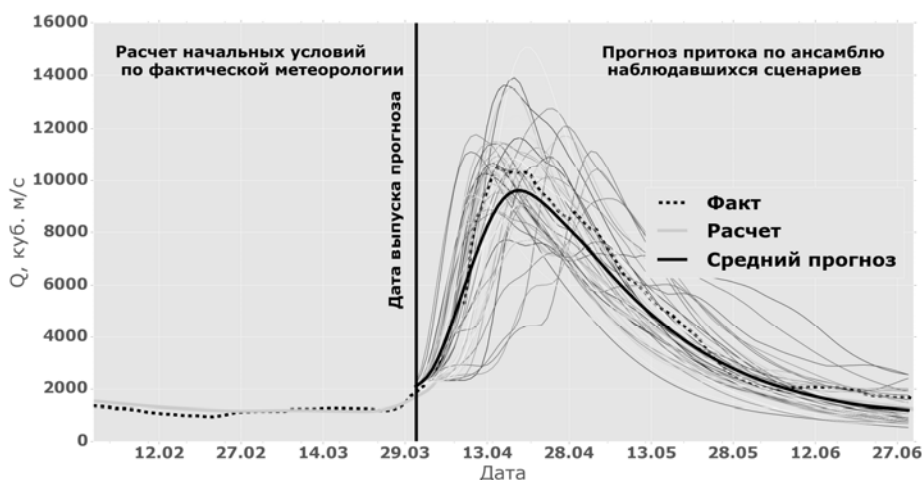


Рис. 4. Пример построения ансамбля проверочных прогнозов притока воды к водохранилищу по разработанной прогностической схеме.

#### 4. Результаты проверочных прогнозов притока воды к Чебоксарскому водохранилищу за 1982–2016 годы

##### 4.1. Детерминистический прогноз

При построении детерминистических прогнозов предполагалось, что наиболее вероятная характеристика притока равна среднему значению из ансамбля соответствующих характеристик. В табл. 2, 3 показаны результаты построенных по описанной выше схеме проверочных прогнозов величин  $W$  (км<sup>3</sup>),  $Q_{\max}$  (м<sup>3</sup>/с),  $N_{Q_{\text{ср}}}$  (сут.),  $N_{Q_{\max}}$  (сут.) за 2 квартал 1982–2016 годов.

В табл. 4 приведены критерии качества построенных детерминистических прогнозов: критерий эффективности, рассчитываемый как отношение среднеквадратических погрешностей  $S$  прогноза к среднеквадратическому отклонению  $\sigma$  фактических характеристик; критерий оправдываемости прогнозов характеристик водного режима – доля ошибок прогноза, лежащих в пределах допустимой погрешности, равной  $0,674\sigma$  [6]

Из табл. 4 видно, что разработанная методика дает удовлетворительные результаты долгосрочного прогноза объема и максимального расхода притока воды в водохранилище за 2 квартал, а также числа дней с расходами воды выше среднего максимального значения. По критерию эффективности  $S/\sigma$  прогнозы могут считаться удовлетворительными ( $S/\sigma$  не превышает 0,70), а их оправдываемость находится в пределах 70–80 %.

**Таблица 2.** Детерминистический прогноз объема и максимального расхода притока воды к Чебоксарскому водохранилищу за 2 квартал

Год	Объем притока воды, км <sup>3</sup>				Макс. расход притока воды, м <sup>3</sup> /с			
	Факт.	Прогноз	Абс. ошибка	Отн. ошибка	Факт.	Прогноз	Абс. ошибка	Отн. ошибка
1982	35,52	32,91	-2,62	-0,07	9350	9712	362	35,52
1983	34,51	38,02	3,51	0,10	10100	11025	925	34,51
1984	20,78	17,29	-3,49	-0,17	6700	4277	-2423	20,78
1985	45,71	35,85	-9,86	-0,22	13900	11528	-2372	45,71
1986	44,81	39,71	-5,09	-0,11	14000	12047	-1953	44,81
1987	29,56	23,90	-5,66	-0,19	7500	6653	-847	29,56
1988	30,50	28,32	-2,18	-0,07	7810	7985	175	30,50
1989	25,91	27,13	1,22	0,05	6700	6895	195	25,91
1990	29,70	33,99	4,29	0,14	8130	9476	1346	29,70
1991	38,35	35,50	-2,85	-0,07	10500	10677	177	38,35
1992	33,14	33,36	0,22	0,01	8260	8806	546	33,14
1993	30,21	33,81	3,60	0,12	8870	9392	522	30,21
1994	55,33	40,99	-14,34	-0,26	17500	13232	-4268	55,33
1995	35,15	33,07	-2,08	-0,06	9780	9597	-183	35,15
1996	19,71	19,52	-0,20	-0,01	6140	5040	-1100	19,71
1997	22,73	21,12	-1,61	-0,07	5570	5245	-325	22,73
1998	37,00	37,12	0,12	0,00	9290	11374	2084	37,00
1999	46,12	51,13	5,01	0,11	14100	17389	3289	46,12
2000	30,96	28,25	-2,72	-0,09	9290	8118	-1172	30,96
2001	47,33	42,38	-4,95	-0,10	17200	13840	-3360	47,33
2002	25,28	32,67	7,40	0,29	5850	7853	2003	25,28
2003	34,09	29,46	-4,64	-0,14	8310	8257	-53	34,09
2004	38,27	37,88	-0,38	-0,01	8540	10144	1604	38,27
2005	49,90	37,72	-12,18	-0,24	15750	12079	-3671	49,90
2006	31,94	27,24	-4,70	-0,15	8680	8000	-680	31,94
2007	25,45	27,66	2,21	0,09	7490	9046	1556	25,45
2008	27,95	33,47	5,52	0,20	6990	8234	1244	27,95
2009	24,66	26,37	1,71	0,07	5890	7090	1200	24,66
2010	27,49	30,46	2,97	0,11	7420	7951	531	27,49
2011	26,57	35,52	8,95	0,34	8100	11511	3411	26,57
2012	44,63	41,39	-3,24	-0,07	13850	14026	176	44,63
2013	46,45	45,42	-1,03	-0,02	10900	15534	4634	46,45
2014	19,95	23,34	3,38	0,17	4940	6594	1654	19,95
2015	22,91	20,39	-2,52	-0,11	4520	4667	147,11	0,03
2016	36,88	37,09	0,21	0,01	9510	9992	481,75	0,05
Среднее	<b>33,58</b>	<b>32,56</b>	<b>-1,03</b>	<b>-0,01</b>	<b>9355</b>	<b>9522</b>	<b>167</b>	<b>0,04</b>

**Таблица 3.** Детерминистический прогноз продолжительности периодов высокой водности притока воды к Чебоксарскому водохранилищу за 2 квартал

Год	Число дней с расходами воды >4250 м <sup>3</sup> /с, сут				Число дней с расходами воды >9497 м <sup>3</sup> /с, сут.			
	Факт.	Прогноз	Абс. ошибка	Отн. ошибка	Факт.	Прогноз	Абс. ошибка	Отн. ошибка
1982	46	36,42	-9,58	-0,21	0	4,77	4,77	0,00
1983	39	43,42	4,42	0,11	6	11,85	5,85	0,98
1984	20	6,54	-13,46	-0,67	0	0,00	0,00	0,00
1985	42	37,71	-4,29	-0,10	24	10,42	-13,58	-0,57
1986	45	42,23	-2,77	-0,06	25	13,46	-11,54	-0,46
1987	36	24,98	-11,02	-0,31	0	0,15	0,15	0,00
1988	37	31,44	-5,56	-0,15	0	1,00	1,00	0,00
1989	23	29,75	6,75	0,29	0	0,15	0,15	0,00
1990	30	42,19	12,19	0,41	0	1,21	1,21	0,00
1991	43	38,92	-4,08	-0,09	11	8,04	-2,96	-0,27
1992	42	41,69	-0,31	-0,01	0	2,17	2,17	0,00
1993	35	38,54	3,54	0,10	0	4,10	4,10	0,00
1994	52	41,60	-10,40	-0,20	27	16,31	-10,69	-0,40
1995	44	36,63	-7,38	-0,17	5	4,50	-0,50	-0,10
1996	16	13,15	-2,85	-0,18	0	0,00	0,00	0,00
1997	20	15,48	-4,52	-0,23	0	0,00	0,00	0,00
1998	44	39,71	-4,29	-0,10	0	10,33	10,33	0,00
1999	43	50,15	7,15	0,17	25	22,69	-2,31	-0,09
2000	36	31,42	-4,58	-0,13	0	1,17	1,17	0,00
2001	42	42,29	0,29	0,01	22	17,10	-4,90	-0,22
2002	30	44,23	14,23	0,47	0	0,71	0,71	0,00
2003	41	33,35	-7,65	-0,19	0	1,40	1,40	0,00
2004	45	44,65	-0,35	-0,01	0	7,54	7,54	0,00
2005	46	39,46	-6,54	-0,14	27	13,08	-13,92	-0,52
2006	38	30,23	-7,77	-0,20	0	1,04	1,04	0,00
2007	25	29,85	4,85	0,19	0	0,00	0,00	0,00
2008	24	43,38	19,38	0,81	0	0,88	0,88	0,00
2009	23	29,10	6,10	0,27	0	0,21	0,21	0,00
2010	32	35,33	3,33	0,10	0	1,00	1,00	0,00
2011	29	37,15	8,15	0,28	0	10,46	10,46	0,00
2012	44	41,02	-2,98	-0,07	27	16,88	-10,13	-0,38
2013	51	43,58	-7,42	-0,15	27	20,10	-6,90	-0,26
2014	9	23,90	14,90	1,66	0	0,00	0,00	0,00
2015	10	11,13	1,13	0,11	0	0,00	0,00	1,00
2016	36	43,98	7,98	0,22	1	6,27	5,27	2,00
Среднее	<b>34,80</b>	<b>34,70</b>	<b>-0,10</b>	<b>0,05</b>	<b>6,49</b>	<b>5,97</b>	<b>-0,51</b>	<b>0,02</b>

Менее точными получились прогнозы числа дней с расходами воды выше среднесноголетнего расхода. Полученный результат демонстрирует возможности разработанной прогностической методики, которая позволяет, благодаря использованию гидрологической модели, прогнозировать с удовлетворительной точностью и трехмесячной заблаговременностью не только объем весеннего стока, но и другие характеристики водного режима, расширяя тем самым информационное содержание прогнозов по сравнению с существующими подходами.

**Таблица 4.** Эффективность детерминистического прогноза характеристик притока воды в водохранилище за 2 квартал (прогноз по средним значениям из ансамбля)

W, км <sup>3</sup>		Q <sub>max</sub> , м <sup>3</sup> /с		N <sub>ср</sub> , сут.		N <sub>max</sub> , сут.	
S/σ	Оправдываемость	S/σ	Оправдываемость	S/σ	Оправдываемость	S/σ	Оправдываемость
0,55	86 %	0,57	77 %	0,72	66 %	0,55	77 %

#### 4.2. Вероятностный прогноз

Результаты ансамблевых прогнозов гидрографов весеннего стока могут быть представлены в вероятностной форме, что дает возможность пользователю прогноза оценить риск принятия решений и выстроить на этом основании более гибкую систему управления водноресурсной системой, принять более эффективные меры защиты от опасных гидрологических явлений, чем в случае детерминистического (однозначного) прогноза.

Наиболее распространенное и информативное представление вероятностного прогноза речного стока заключается в построении функции распределения вероятности (ФРВ) прогнозируемой величины. На сравнении ФРВ прогнозируемой и наблюдаемой величин стока основаны методы верификации вероятностных прогнозов, широко применяемые в оперативной метеорологии [1, 14] и со сравнительно недавних пор используемые для оценки качества ансамблевых гидрологических прогнозов (первые примеры такого использования в отечественных публикациях показаны в [2, 3]).

Ординаты интегрального распределения вероятности прогнозируемой характеристики водного режима  $y_{np}$  для  $j$ -го сезона из проверочного ряда рассчитываются как

$$F_m(j) = \sum_{i=1}^m f_i(j), \quad m=1, \dots, M; \quad j=1, \dots, N; \quad (1)$$

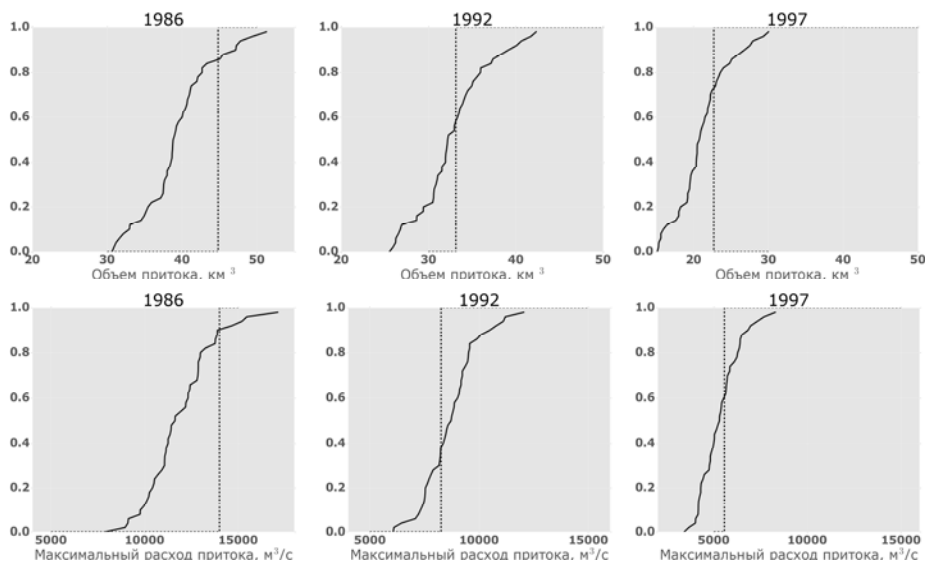
где  $M$  – число интервалов вероятностей, на которое разбивается интервал  $[0;1]$ ;  $N$  – число проверочных прогнозов;  $f_i$  – частота попадания прогнозируемой величины в заданный интервал.

Ординаты интегрального распределения вероятности фактической характеристики стока  $y_{факт}$  для  $j$ -го сезона из проверочного ряда оцениваются как

$$O_m(j) = \sum_{i=1}^m o_i, \quad m=1, \dots, M; j=1, \dots, N, \quad (2)$$

где  $o_i=1$  в интервале, куда попала наблюдаемая величина, и  $o_i=0$  в остальных интервалах.

На рис. 5 показаны функции распределения прогнозируемых объемов и максимальных расходов притока воды к Чебоксарскому водохранилищу, построенные по полученным в результате ансамблевых экспериментов выборкам объемом 50 значений для характерных сезонов 1986, 1992 и 1997 гг. (высокое, среднее и низкое половодья соответственно). На этом же рисунке показаны функции распределения фактических величин стока.



**Рис. 5.** Интегральные функции распределения долгосрочных прогнозов объема (вверху) и максимального расхода (внизу) притока воды к Чебоксарскому водохранилищу за 2 квартал (сплошная линия) в сравнении с распределением фактических характеристик стока (пунктирная линия) для половодий 1986, 1992 и 1997 гг.

По приведенным иллюстрациям можно сделать выводы, например, о доверительном интервале прогнозируемых значений характеристик стока. Так, согласно проверочному долгосрочному вероятностному прогнозу высокого половодья 1986 г. его объем с вероятностью 90 % находится в диапазоне от 31 до 50 км³ (фактический объем стока за 2 квартал в 1986 г. был

45 км<sup>3</sup>). Для низкого половодья 1997 г. 90%-ный доверительный интервал прогноза составил 16–29 км<sup>3</sup> (фактический объем в 1997 г. – 23 км<sup>3</sup>). Для среднего половодья 1992 г. 90%-ный доверительный интервал прогноза составил 26–43 км<sup>3</sup> (фактический объем в 2003 г. – 33 км<sup>3</sup>). О хорошей точности прогноза объема стока для этих лет свидетельствует также то, что средний объем стока для этих лет получился близким к фактическому, что также видно из сравнения кривых распределения.

Долгосрочный вероятностный прогноз максимальных расходов имеет большую неопределенность. 90%-ные доверительные интервалы прогнозов равны: в 1986 г. – от 9100 до 15800 м<sup>3</sup>/с (фактический максимальный расход в 1986 г. – 14000 м<sup>3</sup>/с), 1997 г. – от 3580 до 7590 м<sup>3</sup>/с (фактический максимальный расход в 1997 г. – 5570 м<sup>3</sup>/с), 1992 г. – от 6310 до 11430 м<sup>3</sup>/с (фактический максимальный расход в 1992 г. – 8260 м<sup>3</sup>/с).

Эффективность прогностической методики по сравнению с климатическим прогнозом (т. е. использованием в качестве прогноза безусловного распределения вероятности наблюдаемых величин стока) оценивается величиной:

$$RPSS = 1 - \frac{\overline{RPS}}{\overline{RPS}_{cl}}, \quad (3)$$

где  $\overline{RPS}$  – так называемая оценка ранжированной вероятности (Ranked Probability Score) – погрешность вероятностных прогнозов, осредненная по всем ансамблям и по всему диапазону вероятностей, рассчитываемая по формуле:

$$\overline{RPS} = \sum_{m=1}^M MSE_m = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \sum_{m=1}^M (F_m(j) - O_m(j))^2, \quad (4)$$

где  $\overline{RPS}_{cl}$  – величина  $\overline{RPS}$  для климатического прогноза, которая рассчитывается по формуле (4), при этом  $F_m(j)$  определяются по интегральному распределению фактических величин стока, построенному по многолетнему ряду наблюдений.

По осредненным значениям  $RPS$  было рассчитано значение показателя  $RPSS$ , который характеризует эффективность оцениваемой методики по сравнению с климатическим прогнозом. Положительные значения этого показателя показывают наличие дополнительной информации в прогнозе, получаемом по оцениваемой методике, а идеальным значением его является 1.

Для прогноза объема притока воды в Чебоксарское водохранилище за 2 квартал значение  $RPSS$  составило 0,304. Иными словами, вероятностный прогноз объема половодья оказался на 30 % эффективнее климатического прогноза.

## 5. Опыт оперативного прогноза притока воды к водохранилищу во 2 квартале 2017 года

Условия формирования половодья 2017 года в бассейне Чебоксарского водохранилища заметно отличались от среднеголетних условий. При этом состояние водосбора перед началом снеготаяния было близким к норме: запас воды в снеге на начало марта был несколько выше нормы (на 10–15 %), запас воды в почве и глубина ее промерзания – близки к норме. Однако, установившаяся уже в первой половине марта на всей территории бассейна необычно теплая и солнечная погода способствовала тому, что интенсивное таяние снежного покрова и подъем уровня воды в реках начались на полмесяца раньше средних климатических сроков. В третьей декаде марта осуществилось вторжение более холодных и влажных воздушных масс в бассейн Средней Волги, что привело к выпадению обильных осадков, общее количество которых превысило четверть месячной нормы марта. В результате такого развития метеорологических процессов, в марте объем притока воды в водохранилище превысил норму почти на треть. Периоды интенсивного таяния, периодически сменяющиеся резким многодневным похолоданием и выпадением большого количества осадков, в том числе снега, наблюдались и далее, в течение апреля-мая 2017 года (на ряде станций выпадение твердых осадков наблюдалось даже в начале июня). Разнообразие погодных условий формирования речного стока в период снеготаяния, их существенное отличие от среднеголетних условий, отразилось на режиме притока воды в Чебоксарское водохранилище: гидрограф притока воды к водохранилищу в период половодья 2017 года заметно отличался от среднеголетнего.

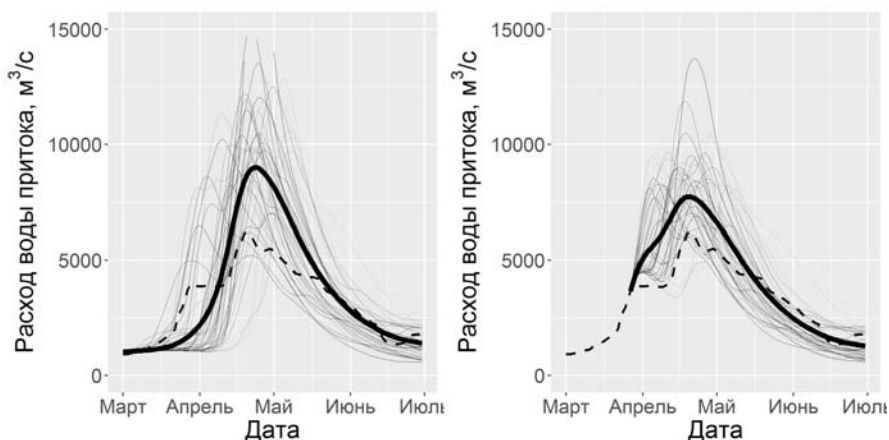
Описанная выше прогностическая система была протестирована специалистами ИВП РАН и Гидрометцентра России в оперативном режиме в течение 2 квартала 2017 года. Прогнозы характеристик притока воды в Чебоксарское водохранилище за 2 квартал (период 1 апреля – 30 июня) выпускались по описанной выше схеме 1, 15 и 27 марта. Кроме того, 15 и 27 апреля выпускались уточненные прогнозы с учетом фактического притока за период, прошедший дате выпуска уточнения. На рис. 6 приведены ансамбли прогностических гидрографов от даты выпуска прогноза до 30 июня в сравнении с фактическим гидрографом стока с 1 апреля по 30 июня.

Полученные значения объема притока и максимального расхода, осредненные по ансамблям гидрографов, рассчитанных при разных датах выпуска прогноза, приведены в табл. 5.

Как видно из табл. 5, прогнозируемая величина объема притока воды в водохранилище оказалась выше фактической для всех дат выпуска прогноза. При этом погрешности прогноза оказались невелики, и уже при заблаговременности прогноза 3,5 месяца (дата выпуска прогноза 15 марта) стали ниже погрешности климатического прогноза. С дальнейшим уменьшением заблаговременности прогноза его погрешность еще более снизилась. Погрешность прогноза максимального расхода оказалась существенно выше: при заблаговременности 3 месяца составила 37 %, что связано



прежде всего с упоминавшимися выше отличиями метеорологических условий снеготаяния 2017 года от среднемноголетних.



**Рис. 6.** Ансамблевый прогноз притока воды к Чебоксарскому водохранилищу при разных датах выпуска прогноза: прогноз на период 1 марта – 30 июня (слева); 27 марта – 30 июня (справа); пунктирная линия – фактический гидрограф; тонкие серые линии – ансамбль прогнозируемых гидрографов; жирная линия – средний по ансамблю гидрограф.

**Таблица 5.** Сведения о фактическом и спрогнозированном притоке воды в Чебоксарское водохранилище за второй квартал 2017 года

Дата выпуска прогноза	Наиболее вероятное значение ожидаемого притока воды за 2 квартал, км <sup>3</sup>	Фактический приток воды за 2 квартал, км <sup>3</sup>	Абсолютная ошибка прогноза, км <sup>3</sup>	Ошибка прогноза в % от фактического притока	Абсолютная (в км <sup>3</sup> )/ относительная (в % от фактического притока) ошибка климатического прогноза
1.03.2017	35,0	28,9	6,1	21%	4,50 / 16%
15.03.2017	33,2	28,9	4,3	15%	4,50 / 16%
29.03.2017	32,8	28,9	3,9	13%	4,50 / 16%
15.04.2017	30,4	28,9	1,6	5%	4,50 / 16%
27.04.2017	31,5	28,9	2,7	9%	4,50 / 16%

## Заключение

В статье описана методика долгосрочного ансамблевого прогноза весеннего притока воды в Чебоксарское водохранилище, которая основана на использовании гидрологической модели, созданной в ИВП РАН на базе ИМК ЕСOMAG. Проведена проверка предлагаемой методики по данным наблюдений за 35 лет – с года наполнения водохранилища. Описаны результаты оперативных испытаний гидрологической модели по данным

наблюдений в 2017 году. Удовлетворительные результаты проверочных прогнозов дают основание рассматривать предлагаемую методику как источник дополнительных, по отношению к существующим, прогностических данных о характеристиках режима притока воды в водохранилище, что расширяет информационное содержание прогноза для лиц, принимающих решение. По сравнению с традиционно используемыми в России методами долгосрочного прогноза объема притока воды в водохранилища, разрабатываемая методика позволяет:

1. Оценить характеристики начальных (на дату выпуска прогноза) условий в бассейне Чебоксарского водохранилища (запасы воды в снеге и в русловой сети, влажность и промерзание почвы) только по данным стандартных метеорологических наблюдений, что является существенным достоинством методики в условиях сокращения сети гидрометеорологических станций и постов Росгидромета.

2. Прогнозировать не только объем и максимальный расход, но и другие характеристики водного режима (например, продолжительности периодов заданной водности), что позволяет расширить содержание выпускаемых прогнозов для потребителей.

3. Выпускать прогноз не только в детерминистической, но и в вероятностной формах в рамках одной методики.

4. Прогнозировать характеристику притока с любой выбранной даты, т. е. на единой методической основе может выпускаться прогноз водного режима, как на период весеннего половодья, так и летней межени. Существующие же методики долгосрочного гидрологического прогноза различаются в зависимости от прогнозируемой фазы водного режима, расчетными схемами, требованиями к исходной информации, предикторами и точностью их оценки по данным измерений, набором параметров и т. п.

Вместе с тем, несмотря на успешную в целом верификацию методики по данным о проверочных прогнозах, выявлены возможные пути повышения ее точности. К таким возможностям прежде всего относятся:

1. Корректировка начальных условий, рассчитываемых гидрологической моделью по фактическим метеорологическим данным за осенне-зимний период до даты выпуска прогноза, с учетом имеющихся данных наблюдений о предшествующем состоянии водосбора, в частности о запасах воды в снеге и в речной сети.

2. Усвоение данных среднесрочного (до 10 суток) и, возможно, сезонного метеорологических прогнозов для уточнения ансамбля сценариев погоды на период заблаговременности прогноза.

В настоящее время начата модернизация описанной прогностической методики, с учетом указанных возможностей, для ее оперативного тестирования на данных будущего половодья 2018 года.

## Список использованных источников

1. Груза Г.В., Ранькова Э.Я. Вероятностные метеорологические прогнозы. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 272 с.
2. Кучмент Л.С., Гельфан А.Н. Исследование эффективности ансамблевых долгосрочных прогнозов весеннего половодья, основанных на физико-математических моделях формирования речного стока // Метеорология и гидрология. 2009. № 2. С. 54-67
3. Кучмент Л.С., Гельфан А.Н. Ансамблевые долгосрочные прогнозы весеннего половодья с помощью физико-математических моделей формирования стока // Метеорология и гидрология. 2007. № 2. С. 83-95
4. Мотовилов Ю.Г. Гидрологическое моделирование речных бассейнов в различных пространственных масштабах. 1. Алгоритмы генерализации и осреднения // Водные ресурсы, 2016, Т. 43, № 3. С. 243-253.
5. Решение совместного заседания НТС Росгидромета, Научного совета РАН «Исследования по теории климата Земли» и НТС Росводресурсов по вопросу «Экстремальные паводки в бассейне р. Амур: причины, прогнозы, рекомендации», Москва, 20 января 2014 г. // Экстремальные паводки в бассейне р. Амур: причины, прогнозы, рекомендации. Сборник докладов. М.: Росгидромет, 2014. 207 с.
6. Руководство по гидрологическим прогнозам. Выпуск 1. Долгосрочные прогнозы элементов водного режима рек и водохранилищ. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 358 с.
7. Day G.N. Extended streamflow forecasting using NWS-RFS J // Water Resour. Planning Manage. 1985. Vol. 111. P. 157–170
8. Druce D.J. Insights from a history of seasonal inflow forecasting with a conceptual hydrologic model // J. Hydrol. 2001. Vol. 249. P. 102–112.
9. Gelfan A.N., Motovilov Yu.G. Long-term hydrological forecasting in cold regions: retrospect, current status and prospect // Geography Compass. 2009. Vol. 3(5). P. 1841-1864. doi:10.1111/j.1749-8198.2009.00256.x.
10. Gelfan A., Motovilov Yu., Moreido V. Ensemble seasonal forecast of extreme water inflow into a large reservoir // Proc. IAHS. 2015. Vol. 369. P. 115–120. doi:10.5194/piahs-369-115-2015.
11. McEnery J., Ingram J., Duan Q., Adams T., Anderson L. NOAA's advanced hydrologic prediction service: building pathways for better science in water forecasting // Am. Meteorol. Soc. 2005. Vol. 86. P. 375–385.
12. Motovilov Yu.G., Gottschalk L., Engeland K., Belokurov A. ECOMAG: Regional model of hydrological cycle. Application to the NOPEX region. OSLO, NORWAY: Department of Geophysics, University of Oslo, 1999. 88 p.
13. Pappenberger F. et al. Hydrological ensemble prediction systems around the Globe // Handbook of Hydrometeorological Ensemble Forecasting / Duan et al. (Eds.). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2016. P. 1-35. doi 10.1007/978-3-642-40457-3\_47-1.
14. Wilks D.S. Statistical methods in the atmospheric sciences: chapter 7. San Diego: Academic Press, 1995.

## SUMMARIES

**Long-term ensemble forecasting of spring inflow into the Cheboksary reservoir based on the hydrological model: results of operational testing** / Borsch S.V., Gelfan A.N., Moreydo V.M., Motovilov Yu.G., Siminov Yu.A. // Proceedings of Hydrometcentre of Russia. 2017. Vol. 366. P. 68-86.

A feasibility assessment for using of the hydrological model ECOMAG for operational long-term (3–4 months ahead) ensemble forecasting of unregulated water inflow into the Cheboksary reservoir during the spring freshet is presented. The results are given for hindcasts of water inflow into the reservoir for 35-year-long period (1982–2016). The proposed scheme has proven its skill to forecast the inflow volume, maximum inflow discharge and number of days with discharge above mean annual maximum as satisfactory. The results of operational scheme testing during the freshet event of 2017 are presented. Prospects for improving the forecast skill by assimilating the observations of inflow and snow water content in the model are discussed.

*Keywords:* long-term hydrological forecasting, hydrological modelling, reservoir inflow forecasts, Cheboksary reservoir.