

УДК 556.536+519.688

Развитие системы прогнозирования наводнений в Российской Федерации. Часть 2. Специфика изменений

А.В. Романов

*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр
Российской Федерации, г. Москва, Россия
alexey.romanov@mecom.ru*

Проанализирован комплекс научно-методических решений, определяющих уровень существующей в Российской Федерации системы прогнозирования наводнений. Результаты анализа в сопоставлении с аналогичными работами, проводимыми за рубежом, а также в ведущих российских научно-исследовательских центрах позволяет выделить несколько основных направлений, определяющих развитие этого направления гидрологии суши на ближайшую и дальнюю перспективу.

Ключевые слова: наводнение, гидрологические прогнозы, уровень воды, расход воды, гидрологические модели формирования стока, модернизация и техническое перевооружение, беспилотные летательные аппараты, профессиональные социальные сети

Development of flood forecasting system in Russia. Part II. Specificity of changes

A.V. Romanov

*Hydrometeorological Research Center of Russian Federation, Moscow, Russia
alexey.romanov@mecom.ru*

Complex of scientific and methodological solutions determining the level of the existing Flood Forecasting System in Russia has been analyzed. The results of the analysis in comparison with similar works carried out abroad and in leading Russian research centers allows us to highlight a few main areas determining the development of this field of hydrology in near and distant future.

Keywords: flooding, hydrological forecasts, water level, water discharge, hydrological models of runoff formation, modernization and technical re-equipment, unmanned aerial vehicles, professional social networks

Данная работа является продолжением анализа существующих систем прогнозирования наводнений (СПН), начатого в ее первой части [10]. Нумерация разделов (подразделов) носит сквозной характер по всей работе, состоящей из первой и второй частей.

2. Тенденции развития СПН

В основу создания любой СПН положено использование материалов наблюдений на существующей гидрометеорологической сети наблюдений

и фиксированного набора методов, моделей и технологических процедур, позволяющих трансформировать эти данные наблюдений в гидрологические прогнозы уровней и расходов воды для фиксированных водпостов и гидрометрических створов рассматриваемой речной системы. В настоящее время в рамках проектов Модернизация-1 и Модернизация-2 практически все УГМС Российской Федерации оснащаются современной дорогостоящей импортной измерительной аппаратурой (стоимость технических приборов изменяется от 300 000 до нескольких миллионов рублей), позволяющей существенно упростить комплекс технологических процедур, связанных с измерением основных характеристик водного режима и их обработкой.

Указанный ранее набор технических средств уже в ближайшее время будет дополняться беспилотными летательными аппаратами (БПЛА) и новыми средствами дистанционного зондирования водной поверхности, включая подповерхностную радиолокацию. Если раньше для решения гидрологических задач применялись спутники и пилотируемая авиация, то сейчас наступает период активного использования БПЛА. Применение современных БПЛА намного превосходит другие технологии по стоимости и оперативности (<http://unmanned.ru/news/>). БПЛА могут совершать полет в автономном режиме, время полета небольших аппаратов превосходит 4 часа, а скорость достигает 60–70 км/ч. На рынке появился большой выбор приборов дистанционного зондирования, пригодный для установки на легкие БПЛА: радары, лидары (лазерные сканеры), батиметры (для измерения глубин), фото и видеокамеры, тепловизоры и мультиспектральные камеры. В настоящее время БПЛА начинают применяться (в России и за рубежом) для сканирования рельефа, а также для сбора информации, используемой как для краткосрочных прогнозов наводнений, так и для определения зоны затопления.

Учитывая размеры территории нашей страны и исключительно большое разнообразие природных зон, в которых формируется сток речных систем, Российская Федерация по уровню решения большинства административных, технологических и методических проблем пока находится только в самом начале сложного пути создания современной СПН.

2.1. Общая характеристика обновления

Современная наука давно уже стала планетарной, а соответствующее ей разделение труда, или рынок труда, реально существующий практически по всем фундаментальным и прикладным наукам уже более 15 лет, касается и гидрологии суши. Достаточно сказать, что если детально проанализировать профили наиболее продвинутых в этой области специалистов, использующих в своей работе профессиональные социальные сети LinkedIn (<https://www.linkedin.com/groups/my-groups>), ResearchGATE (<https://www.researchgate.net/>) и The Water Network (<https://thewaternetwork.com/>), то несложно выделить те области знания,

компетентное представление о которых сегодня является уже практически обязательным при разработке СПН. В частности, к ним относятся: математическое моделирование гидрологических процессов, гидравлика открытого русла, численное моделирование с использованием библиотеки MATLAB, дистанционные методы зондирования, визуализация данных наблюдений, ArcGIS, программирование на языках Fortran, Python и R в разных операционных средах.

Перечисленные разделы гидрологии суши, математики, геофизики и информационных технологий непосредственно связаны с реализацией различных по уровню сложности моделей формирования стока, используемых в СПН. В силу ряда объективных и субъективных причин, набор таких моделей, реально используемых в сетевых структурных организациях Росгидромета, пока крайне ограниченный. Доминируют модели краткосрочных прогнозов уровней воды, в основу которых положены линейные уравнения регрессии, не требующие больших вычислительных мощностей, сложного программного обеспечения и больших объемов исходной гидрометеорологической информации. В частности, в оперативной практике ФГБУ «Обь-Иртышское УГМС» в период летне-осенней межени для целей краткосрочных прогнозов уровней воды по ряду пунктов среднего и нижнего течения р. Иртыш широко используются прогностические регрессионные уравнения следующего вида [9]:

$$H_{P,j+\tau}^i = \sum_{l=1}^L k_l H_{\Phi,j}^l + k_{L+1}, \quad (1)$$

$$H_{P,j+\tau}^i = \sum_{l=1}^{L-1} k_l H_{\Phi,j}^l + k_L H_{\Phi,j-2}^L + k_{L+1}, \quad (2)$$

$$H_{P,j+\tau}^i = k_1 H_{\Phi,j}^i + \sum_{l=2}^{L-1} k_l (H_{\Phi,j}^l - H_{\Phi,j-\tau}^l) + k_L, \quad (3)$$

где $H_{P,j+\tau}^i$ – предсказанное с заблаговременностью τ значение уровня воды для i -го водпоста в момент времени $j + \tau$, k_l – коэффициенты, определяемые методом наименьших квадратов; $H_{\Phi,j}^l$ – фактические значения уровней воды для l -го водпоста в момент j ; L – число предикторов. Такие прогностические уравнения могут независимо использоваться для разных периодов, в том числе и при развитии половодья. Однако лучшие результаты они дают на спаде половодья и в период межени. Аналогичные подходы широко применяются для оперативных гидрологических прогнозов и в ряде других УГМС (ФГБУ «Северное УГМС», ФГБУ «Среднесибирское УГМС», ФГБУ «Центральное УГМС»).

Конечно, корреляционные связи, как и метод соответственных уровней с переменным временем добегания [13], по-прежнему в силу своей доступности широко используются в рамках СПН, но серьезного продвижения в физическом понимании процессов, которые происходят в русле

и на водосборе они не обеспечивают. И, самое главное, эти связи становятся абсолютно бессильными, когда возникает проблема перехода к усвоению новых видов информации, которыми так лавинообразно богат XXI век в условиях существенного обновления технической базы измерительной аппаратуры, используемой в УГМС.

Только в последние годы намечилось определенное продвижение в этой области за счет комплексной реализации модели Гидрометцентра России для водосбора р. Кубань [1], а также реализации концептуальной модели формирования стока для рек с сильно заболоченными территориями в ФГБУ «Среднесибирское УГМС» [3]. При этом в обоих случаях им предшествовала длительная по времени работа (несколько десятилетий), связанная с адаптацией программного обеспечения к современным требованиям операционных систем и администрированию баз данных. Однако даже эти на первый взгляд положительные примеры не полностью соответствуют требованиям сегодняшнего времени. Прежде всего это касается их доступности и строгой формализованной документированности, которая предусматривается в двух случаях: включение ПО модели в фонд алгоритмов и программ Гидрологической оперативной многоцелевой системы ВМО (HOMS, <http://www.wmo.int/pages/prog/hwrrp/homs/documents/plan-en.pdf>, http://www.wmo.int/pages/prog/hwrrp/homs/homs_ru.html), а также использование его в рамках СПН.

В течение уже многих лет в гидрологическом сообществе ведутся дискуссии о возможностях и необходимости использования программного гидрологического обеспечения, созданного за рубежом и представленного в открытом доступе как “freeware software”, в виде компонент HOMS (http://www.wmo.int/pages/prog/hwrrp/homs/complist_en.html), либо в сети Internet (<http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/>, <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/>, <http://www.progea.net/prodotti.php?c=Software&p=ТОПКАРІ>, <https://www.tu-braunschweig.de/Medien-DB/geoekologie/mike-11-short-introduction-tutorial.pdf>). Однако в настоящее время дискуссионный характер этого вопроса уже, можно сказать, закончился и идет переход к реальному внедрению ряда моделей в практику научных исследований.

В первые годы существования программы HOMS происходила достаточно быстрая передача программной документации по компонентам, определяющим ее структуру, практически по всем четырнадцати секциям. В частности, это относится и к Гидрометцентру России, который в 80-х годах XX века передал в HOMS описание нескольких компонент, отражающих уровень разработки автоматизированных гидрологических прогнозов того времени. Аналогичная работа была проведена и сотрудниками ФГБУ «ГГИ». Однако в последующие годы эта работа была практически свернута несмотря на то, что все эти годы в Российской Федерации существует Национальный справочный центр HOMS, который административно закреплен за ФГБУ «ГГИ». В табл. 1 приведены данные по компонентам HOMS, на которые ссылается секретариат ВМО в своих базовых документах [16, 18], которые в последние годы часто запаздывают

с обновлением в рамках стремительно меняющейся конъюнктуры обновления методической и программной базы гидрологических прогнозов.

Таблица 1. Список секций программы HOMS и состав компонент по секциям, определяющим развитие автоматизированных гидрологических прогнозов

Table 1. List of sections of HOMS program and the components by sections determining a development of automated hydrological forecasts

№	Посекционные названия компонент HOMS	Кол-во компонент
Секция J: Модели, используемые для гидрологических прогнозов		
<i>J04 Прогнозирование речного стока по данным гидрометеорологических наблюдений</i>		
1	J04.1.01 Модель Tank	8
2	J04.1.04 Модель талого стока (SRM)	
3	J04.1.05 Модели функции приток-аккумуляция-отток (ISO)	
4	J04.2.01 Концептуальная модель водосбора для прогноза паводка	
5	J04.2.02 Концептуальная модель водосбора (модель HBV)	
6	J04.3.01 Модель Sacramento, учитывающая влажность почвы (NWSRFS-SAC-SMA)	
7	J04.3.03 Модель накопления и абляции снега (NWSRFS-CHEG-17)	
8	J04.3.07 Синтезированные ограничения линейной системы (SCLS)	
<i>J10 Прогнозирование гидрографа стока</i>		0
<i>J15 Комбинированные модели прогноза гидрографа стока и трансформации</i>		
1	J15.2.01 Синтез речного стока и регулирования водохранилищем (SSARR)	2
2	J15.3.01 Руководство по программе калибровки (NWSRFS-MCP3)	
Секция K: Гидрологический анализ для планирования и проектирования инженерных сооружений и водноресурсных систем		
<i>K35 Моделирование гидрографа стока и трансформации</i>		
1	K35.1.04 Расчет профилей водной поверхности в открытых каналах	8
2	K35.1.05 Численные решения нелинейного метода Маскингам	
3	K35.2.03 Время добегаия и K метод расчета трансформации речного стока (NWSRFS-LAG/K)	
4	K35.2.06 Численная модель профиля водной поверхности (WSPRO)	
5	K35.2.09 Гидрология наводнений внутренней территории бассейна (HEC-IFH)	
6	K35.3.06 Система анализа речной системы (HEC-RAS)	
7	K35.3.13 Модель динамики потока по рукавам речной сети (BRANCH)	
8	K35.3.14 Модель речного потока для одномерного представления движения воды в системе открытых каналов на основе диффузионной аналогии (DAFLOW)	

Анализ табл. 1 показывает, что в настоящее время Российская Федерация не представлена своими компонентами ни в одной из секций, которые доминируют по этому направлению (Секция J: Модели, используемые для гидрологических прогнозов и Секция K: Гидрологический анализ для целей планирования и проектирования инженерных сооружений и систем водных ресурсов). Экономические потери от катастрофических наводнений в Российской Федерации постоянно возрастают и требуют принципиально иного отношения к данным задачам, которое не идет в сравнение с тем, как тактически и стратегически правильно развиваются работы в Гидрометцентре России в области численных прогнозов погоды [4].

2.2. Детализация развития

Из всех наиболее развитых на сегодняшний день СПН ближе всех к потребностям Российской Федерации и территориально с ней связана система EFAS, которая была запущена в оперативном режиме в декабре 2014 года с испытательным периодом на шесть лет. В настоящее время EFAS позволяет выпускать оперативные гидрологические прогнозы с различной заблаговременностью по территории практически всей Европы с использованием гидрологической модели с распределенными параметрами LISFLOOD на базе ГИС-технологий [15, 17]. В качестве метеорологических прогнозов в LISFLOOD обрабатываются данные, полученные на выходе ансамбля моделей, представленных в табл. 2.

Таблица 2. Состав метеорологических моделей, используемых в EFAS
Table 2. List of meteorological models used in EFAS

Название модели	Пространственное разрешение	N	S
ECMWF-HRES	T1279/16 км	137	10
ECMF-ENS	T639/32 км (для заблаговременности 1–10 суток); T319/64 км (для заблаговременности 11–15 суток)	91	15
Служба погоды Германии	7 км (для заблаговременности до 3 суток); 30 км (при заблаговременности больше 3 суток)	40	7
COSMO-LEPS	7 км	40	5.5

Примечание. N – число вертикальных слоев; S – максимальная заблаговременность (в сутках).

На базе метеорологической информации (осадки, температура воздуха, испаряемость, скорость испарения с открытой поверхности воды и поверхности почвы) LISFLOOD позволяет рассчитать водный баланс с 6-часовым интервалом для каждой ячейки сетки. При этом учитываются следующие физические процессы: таяние снега, промерзание почвы, поверхностный сток, инфильтрация в почву, грунтовый сток, распределение влажности почвы по его профилю, дренаж воды в систему грунтовых

вод, накопление подземных вод, базисный сток подземных вод. Трансформация речного стока для каждой ячейки сетки речной системы осуществляется на базе уравнения кинематической волны. Все расчеты выполняются для сетки 5×5 км в азимутальной равновеликой проекции Ламберта. Калибровка параметров модели была выполнена в 2013 году для 693 водосборов Европы. Из них 659 водосборов откалиброваны с 9 параметрами модели. Для оставшихся 34 водосборов, учитывающих процессы, происходящие на водохранилищах, использовалась калибровка модели с рядом дополнительных параметров.

Существенно дополняет EFAS по ряду важных характеристик процесса формирования стока программа Гидрометеорологические данные и технологии для эффективного прогнозирования быстроразвивающихся паводков (HYDRATE, <http://www.hydrate.tesaf.unipd.it>). Определяющими в этой европейской программе является деятельность девяти университетов и семи государственных научно-исследовательских центров. В основу программы положена методология наблюдений за быстроразвивающимися паводками с использованием данных существующей сети гидрометеорологических наблюдений, расположенных в потенциально опасных районах с точки зрения возникновения данного явления. Реализация программы проводится в рамках развития технологий и инструментария с целью создания системы раннего предупреждения наводнений. В стратегию исходных данных наблюдений программы HYDRATE входит использование данных радаров, традиционных данных гидрометеорологических наблюдений, а также данных обследований, проводимых после прохождения паводка.

Очень быстро и динамично развивается в последние годы система CHPS, созданная и реализованная на базе сразу нескольких масштабных проектов в рамках совместной деятельности NWS (Национальной службы погоды) и USACE (Инженерного корпуса США). Базовой основой CHPS служит Система речных прогнозов национальной службы погоды (NWSRFS, http://www.nws.noaa.gov/oh/hrl/nwsrfs/users_manual/part5/_pdf/532opers.pdf), начало развития которой относится к 1970 году. Данная система была написана на языке FORTRAN 77 и включает в себя пять основных компонент: 1) Оперативная прогностическая система (OFS); 2) Система калибровки (CS); 3) Система ансамблевых прогнозов речного стока (ESP); 4) Система учета критических осадков (FFG); 5) Интерактивная прогностическая программа (IFP).

Состав моделей, определяющих широкие возможности оперативного использования NWSRFS, насчитывает 32 компоненты, которые непрерывно совершенствуются по мере развития информационных технологий. Отметим, что данный набор моделей детально отражает практически все физические процессы, определяющие процесс формирования речного стока. В частности, NWSRFS включает в себя семь видов модели дождевого стока на базе индекса предшествующего увлажнения (API), Гидрологическую модель с распределенными параметрами (DHM-OP), а также две модели накопления и абляции снежного покрова (SNOW-17, SNOW-43).

В основу создания CHPS была положена модульная структура NWSRFS с использованием клиент-сервисной архитектуры (на базе языка Java) Системы раннего предупреждения о наводнении (FEWS), разработанной в DELTARES. Интересно сопоставить состав моделей, входящих в CHPS (<http://www.nws.noaa.gov/oh/hr1/general/indexdoc.htm>) и используемых в США, с составом NWSRFS (табл. 3). Количественно число используемых моделей сократилось с 30 до 21. Однако технологически модели, входящие в CHPS, имеют более сложную физико-математическую структуру, привязаны к ГИС-системам и практически охватывают все процессы, происходящие на водосборе.

В течение последних 25 лет в США постоянно возникали и развивались различные по значимости и по объему финансирования программы, направленные на совершенствование системы управления водными ресурсами. В настоящее время в США произошли коренные изменения в системном подходе в области изучения и использования водных ресурсов. В частности, 26 мая 2015 года на территории университета штата Алабама в г. Tuscaloosa (США) был открыт Национальный Водный Центр (NWC). Все основные задачи этого центра сформулированы в дорожной карте Комплексной системы науки и услуг водных ресурсов (IWRSS), представляющей собой широкую программу работ по решению проблем использования водных ресурсов. В рамках этой программы задействованы все федеральные ведомства США. При этом ключевые позиции занимают NWS, USACE и USGS, непосредственно связанные с задачей совершенствования автоматизированных систем прогнозирования всех гидрологических элементов, включающей в себя такие вопросы, как управление водными ресурсами, затопление поймы, прогноз паводков, прорывы плотин, ледообразование на реках, смягчение последствий засухи, водоснабжение, совершенствование моделей формирования стока.

К сожалению, отсутствие в Российской Федерации единой современной (цифровой) информационной гидрологической базы данных по основным речным системам существенно тормозит процесс внедрения принципиально новых методов гидрологических прогнозов. Доступ к таким материалам через ВНИИГМИ-МЦД по финансовым соображениям часто становится практически нереальным, в то время как уже в течение нескольких лет Консорциум университетов по развитию гидрологической науки (CUAHSI) свободно (бесплатно), дистанционно по сети Internet поддерживает обмен архивной гидрологической информацией по всему земному шару (в том числе и по территории Российской Федерации) через Центр данных водных ресурсов, структурно входящий в CUAHSI (<http://www.cuahsi.org/>).

Крайне медленно идет процесс создания интегрированной информационно-библиотечной сети Росгидромета, предназначенной для сохранения уникальных архивных гидрометеорологических материалов и документов, сформированных в годы практически полного отсутствия возможности их цифрового преобразования [11].

Таблица 3. Компонентный состав моделей, доступный в NWS в рамках CHPS
Table 3. List of models available in NWS within CHPS

Аббревиатура компоненты	Краткое описание модели	Входит в состав CHPS	Входит в состав NWSRFS
BASEFLOW	Моделирование грунтового (базисного) стока	CHPS	NWSRFS
CHANLOSS	Концептуальная модель русловых потерь	CHPS	NWSRFS
CONS-USE	Модель водопотребления	CHPS	NWSRFS
API-CONT	Непрерывная модель API	CHPS	NWSRFS
GLACIER	Ледниковая трансформационная модель	CHPS	NWSRFS
GRIDDED SNOW-17	Сеточная модель накопления и абляции снежного покрова	CHPS	-
RES-J	Объединенная модель регулирования водохранилища	CHPS	NWSRFS
LAG/K	Модель трансформации с фиксированным и переменным временем добегания	CHPS	NWSRFS
LAY-COEF	Многослойная (с коэффициентом) трансформационная модель	CHPS	NWSRFS
MUSKROUT	Трансформационная модель Muskingum	CHPS	NWSRFS
RSNWELEV	Расчет распределения осадков в виде дождя и снега по высоте	CHPS	NWSRFS
SAC-SMA	Модель Sacramento с учетом влажности почвы	CHPS	NWSRFS
SACHT	Модель Sacramento с учетом влажности почвы и теплопередачи	CHPS	-
RES-SNGL	Модель регулирования одного водохранилища	CHPS	NWSRFS
SNOW-17	Модель накопления и абляции снежного покрова	CHPS	NWSRFS
SSARRESV	Модель SSARR для регулирования водохранилища	CHPS	NWSRFS
SARROUTE	Трансформационная русловая модель SSARR	CHPS	NWSRFS
TATUM	Трансформационная модель Tatum	CHPS	NWSRFS
UNIT-HG	Модель единичного гидрографа	CHPS	NWSRFS
HEC-RAS	Одномерная модель неустановившегося движения воды в русле реки	CHPS	-
HEC-ResSim	Модель эффективности сработки водохранилища	CHPS	-

Наши коллеги в Китае идут по пути создания Китайской национальной системы прогнозирования наводнений (CNFFS), которая во многом копирует модульную структуру, технологию обработки информации и решение большинства административных проблем, реализованных при разработке EFAS и CHPS. Компонентный анализ моделей, определяющих оперативное использование CNFFS, позволяет сделать следующие выводы:

- до сих пор определяющими в системе CNFFS остаются эмпирические (и полумпирические) схемы гидрологического прогнозирования, которые включают в себя следующие широко известные методы: индекс предшествующего увлажнения (API), метод соответственных уровней воды, балансовый метод, многофакторный корреляционный анализ, метод корреляции осадки – сток;
- активно развивается подсистема использования концептуальных моделей стока, в состав которой входят модели, разработанные китайскими специалистами (XIN'ANJIANG, JIANGWAN, LIAONING), ряд зарубежных моделей из CHPS (NAM, SCLS, UNIT-HG), а также международные модели, адаптированные к китайским водосборам (TANK, SAC-SMA, SACHT).

В последние годы в рамках CNFFS китайские специалисты стали активно внедрять в систему гидрологического прогнозирования модели с распределенными и полураспределенными параметрами. В частности, это касается Топографической модели с кинематической аппроксимацией и интегрированием стока (ТОПКАПИ, <http://www.progea.net/prodotti.php?c=Software&p=ТОПКАПИ>). Основу такой модели составляют данные по радарным снимкам 10×10 км, их пространственному распределению с ячейками 1×1 км и результаты количественного прогноза осадков на базе численных моделей прогноза погоды. Параллельно проводится большая работа по адаптации для CNFFS серии работ, выполненных в США в рамках Интерактивной прогностической программы (IFP). Реализация IFP позволяет в режиме реального времени интерактивно генерировать прогнозы водного режима с заблаговременностью от нескольких часов до нескольких суток с их графической интерпретацией. При этом используется тот же набор моделей, который предусмотрен в CHPS.

С учетом выполненного анализа региональных и национальных СПН реально можно допустить два пути создания современной СПН РФ. Один из них состоит в адаптации к своим физико-географическим условиям международных моделей, входящих в состав EFAS и CHPS. Другой путь состоит в постепенном, несистематизированном, часто носящим дублированный характер включении в Автоматизированное рабочее место гидролога (АРМ-гидролога) автоматизированных методов гидрологических прогнозов по наиболее важным речным системам, представляющим интерес прежде всего с точки зрения развития экономики страны. Существенно, что дублирование программного обеспечения, когда одни и те же

модели с одной и той же физико-математической структурой различных гидрологических процессов интерпретируются разными авторами по-разному, оказывается выгодным приложением сил для отдельных специалистов; но оно финансово носит затратный (убыточный) характер для государства, так как не позволяет сформировать один программный продукт для СПН РФ.

И первый, и второй путь имеют право на существование. Однако опыт подавляющего большинства зарубежных стран показывает, что первый путь многократно финансово и по времени более выгодный, чем второй. Наглядным примером этому служит деятельность правительства Китая (с населением 1,5 млрд человек), которое финансово и функционально стимулирует деятельность своих ученых по пути адаптации уже разработанного и технологически законченного программного обеспечения с целью создания на его основе собственной национальной СПН.

Более того, по этому пути уже давно идут метеорологические службы мира, в том числе и Российской Федерации. В частности, несмотря на создание собственных численных моделей циркуляции атмосферы (региональных и глобальных), в Росгидромете было принято решение основной упор в развитии численных методов прогнозов погоды сделать на модель Консорциума по мезомасштабному моделированию (COSMO) [4], разработанную в рамках метеорологического консорциума нескольких стран Европы.

3. Технология реализации решений, определяющих создание СПН

Ранее нами были сформулированы общие принципы и закономерности, положенные в основу создания СПН. Большая часть из них была рассмотрена на примере ряда региональных и национальных систем такого типа. В то же время в Российской Федерации их полноценное функциональное использование часто сдерживают три основных фактора: высокий уровень вандализма (в среднем превышающий 20 % по всей стране), низкий уровень квалификации сотрудников и недостаточный уровень разработки современных прогностических моделей водного режима, технологически увязанных в современную систему представления и распространения прогностической информации.

3.1. Человеческий фактор

Снижение уровня вандализма закономерно связано с повышением общего образовательного уровня населения, на который лишь косвенно влияет деятельность структурных организаций Росгидромета в рамках развития СПН. Что касается низкого уровня квалификации сотрудников УГМС, повсеместно отмечаемого в ежегодных обзорах ФГБУ «ГГИ» [5–7], то для изменения ситуации недостаточно решить вопрос о повышении заработной платы, который обсуждается уже много лет. Этот вопрос

носит комплексный характер и решение его не так очевидно, как кажется на первый взгляд.

Одно из направлений – это постоянное совершенствование программ обучения, которые Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение дополнительного профессионального образования «Институт повышения квалификации руководящих работников и специалистов» (ФГБОУ ДПО «ИПК») разрабатывает и ежегодно организует по этим программам чтение лекций для сотрудников УГМС в целях повышения их квалификации. Однако если предметно-детально рассмотреть программы, предлагаемые ФГБОУ ДПО «ИПК», то можно констатировать, что их уровень (прежде всего по глубине представления материала) существенно отстает от материалов, ежегодно обновляемых в рамках заочных курсов по линии Программ Университета корпорации атмосферных исследований (COMET MetEd) (https://www.meted.ucar.edu/training_detail.php?topicSorting=9&languageSorting=1&module_sorting=publishDateDesc) (рисунок) и очных программ обучения, предлагаемых НЕС (<http://www.hec.usace.army.mil/training/schedule.aspx>).

Время, выделяемое на проведения лекций по линии ФГБОУ ДПО «ИПК», крайне ограничено и практически позволяет дать слушателям только общее представление о проблемах, связанных с разработкой СПН. В сложившихся на сегодня условиях ФГБОУ ДПО «ИПК» должен уже в ближайшей перспективе приступить к решению двух основных задач: 1) организация перевода основных лекций по линии COMET MetEd на русский язык; 2) проведение экспертного сопоставления лекций, сформированных по линии COMET MetEd, с лекциями, читаемыми сотрудниками научно-исследовательских организаций Росгидромета, с целью выбора оптимального пути развития данной формы обучения.

В этих условиях большое значение приобретает деятельность, в рамках непрерывного самообразования, которая по мере развития сети Internet становится уже необходимым и достаточным условием поддержания достаточно высокого уровня профессиональной квалификации. К ней, в частности, относятся использование разнообразных заочных курсов через вебинары, представляемые многими зарубежными и отечественными компаниями, а также анализ текущей информации с использованием профессиональных социальных сетей LinkedIn, ResearchGate, The Water Network.

3.2. Методологические подходы

По каждой из указанных в разделе 1.1 проблем можно подготовить расширенную программу работ, связанную с созданием современной СПН РФ, по аналогии с тем, как это в частности проводилось при создании EFAS и CHPS. Достаточно сказать, что жизненный цикл настройки и адаптации Современной системы интерактивной обработки данных наблюдений за погодой (AWIPS), которая является только частью CHPS, проводился в течение шестнадцати лет (с 1999 по 2014 год) при ежегодном финансировании в объеме 39 млн долларов США.

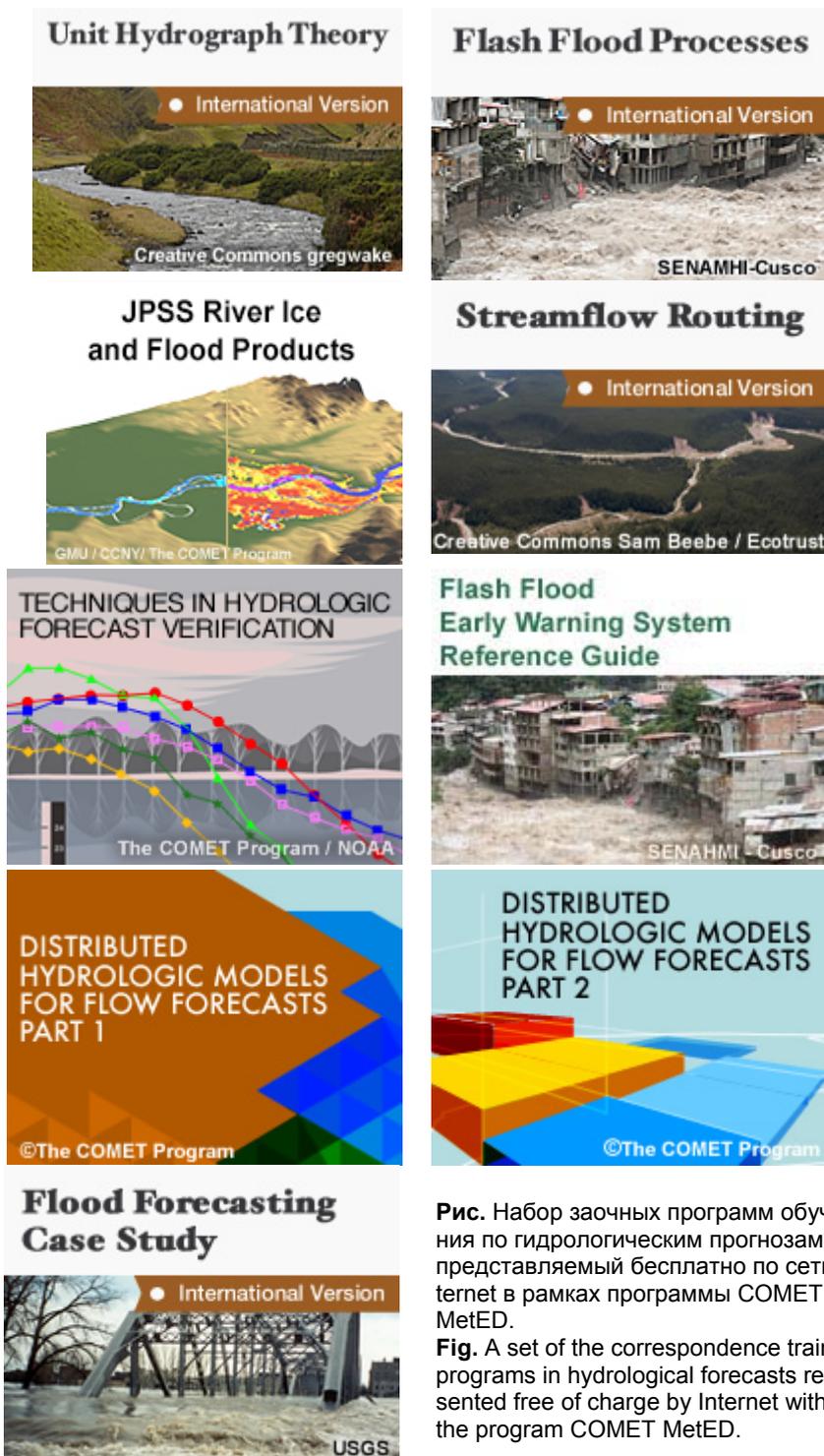


Рис. Набор заочных программ обучения по гидрологическим прогнозам, представляемый бесплатно по сети Internet в рамках программы COMET MetED.

Fig. A set of the correspondence training programs in hydrological forecasts represented free of charge by Internet within the program COMET MetED.

В настоящее время практически все структурные региональные организации Росгидромета, имеющие отношение к гидрологическим прогнозам, а это прежде всего УГМС и ЦГМС, оснащены АРМ-гидролога, разработанным сотрудниками ООО «НПЦ «Мэп Мэйкер» (<http://www.mapmakers.ru/>). В основу АРМ-гидролога положен ежедневно обновляемый архив данных наблюдений за различными гидрометеорологическими характеристиками.

Этот архив создан в формате MS Access 2000 и состоит из файлов HYDRO.MDB (гидрологические наблюдения по кодовой форме КН-15), AGRO_HYD.MDB (агрометеорологические наблюдения по кодовой форме КН-21), SNOW.MDB (наблюдения о снежном покрове по кодовой форме КН-24), SYN32.MDB (синоптические наблюдения по кодовой форме КН-01). В ближайшие годы предполагается развитие программной части архива с использованием SQL-сервера, применяемого для создания, модификации и управления данными.

Фактически реализация АРМ-гидролога носит расчетно-иллюстрационный характер изменения гидрологического режима по фиксированным водпостам для текущего (T_t) и предыдущего (T_{t-1}) моментов времени. Основным прогнозным элементом этого программного модуля является «сервис» прогнозирования значения уровня воды с заблаговременностью одни сутки (T_{t+1}). В основе такого прогноза лежит «линейная экстраполяция», которая дает 100%-ный верный результат для уравнения прямой, в основе которого лежит пропорция

$$\frac{H_t - H_{t-1}}{H_{t+1} - H_{t-1}} = \frac{T_t - T_{t-1}}{T_{t+1} - T_{t-1}},$$

где H_t – уровень воды для фиксированного водпоста в текущий момент времени T_t ; H_{t-1} – уровень воды для фиксированного водпоста в предыдущий момент времени T_{t-1} ; H_{t+1} – уровень воды для фиксированного водпоста в последующий момент времени T_{t+1} , т. е. с заблаговременностью одни сутки. Совершенно очевидно, что даже в случае равномерного, установившегося движения воды, которое наблюдается сравнительно редко, ошибки такого физически практически ничем необоснованного прогноза могут быть катастрофически большими. Поэтому в оперативной практике результаты такого прогноза практически всегда корректируются с учетом интуиции и опыта гидролога-прогнозиста.

Кроме описанного инерционного прогноза уровня воды, в АРМ-гидролога реализован также автоматизированный расчет индекса увлажнения водосбора по формуле Н.Ф. Бефани ($I_W = \sum_{i=1}^N \alpha_i x_i$). Здесь α_i – коэффициенты при осадках, определяющие роль осадков каждого интервала

в формировании влагозапасов на расчетный момент времени; x_i – количество осадков, выпавших за указанный индексом при x интервал времени, относящийся к периоду, предшествующему моменту, на который рассчитывается I_{ij} ; N – число фиксированных интервалов времени, которые теоретически могут быть использованы в задаче краткосрочного прогноза дождевых паводков. В данном случае принципиальным моментом является не расширение совокупности реализованных в АРМ-гидролога методов косвенной оценки влажности водосбора, а совмещение его с краткосрочным прогнозом водного режима в рамках системы гидрологического прогнозирования, что в настоящее время пока не реализовано. Принципиально реализованный подход практически не отличается от широко известного метода расчета API, который широко используется в зарубежных прогностических гидрологических системах и в качестве одной из модульных компонент входит в EFAS и CHPS.

На сегодня программный модуль АРМ-гидролога является пока единственным средством, на базе которого при определенных условиях можно развивать собственную систему гидрологического прогнозирования, аналогичную EFAS/CHPS и Системе управления водными ресурсами Инженерного корпуса армии США (CWMS). Однако для этого необходимо выполнить целый ряд необходимых функций, требующих существенных финансовых затрат и, самое главное, привлечения большого круга разных по профилю специалистов в области прикладного и системного программирования.

Выделим основные проблемы, которые в том или ином виде придется преодолевать и нам, развивая АРМ-гидролога на принципиально другой информационной платформе (ГИС-технологии), которая поддерживается Росгидрометом до 2020 года при совершенствовании СПН РФ:

- формирование общедоступного обмена гидрометеорологическими данными между всеми участниками процесса подготовки и выпуска прогнозов;
- формирование общедоступных электронных архивов исторических данных не только по гидрологическим, но и по метеорологическим, агрометеорологическим, радарным, спутниковым данным, а также информации о снежном покрове;
- выпуск прогностической метеорологической продукции с пространственно-временным разрешением, необходимым для решения задач прогнозирования наводнений по территории как малых речных бассейнов, так и всей страны;
- унификация технологий подготовки и выпуска гидрологических прогнозов по всем речным бассейнам, что позволяет круглогодично проводить обучение новых специалистов унифицированным технологическим операциям вне зависимости от того, в каком УГМС они работают;
- активное использование внутрикорпоративной и международной системы разделения труда в рамках EFAS и CHPS при создании современных систем гидрологического прогнозирования.

В настоящее время достаточно сложно выделить наиболее важные вопросы из перечисленных здесь проблем. Однако в последние годы в силу ряда объективных причин, связанных со стремительным развитием ГИС-технологий на базе ПО ArcGIS компании ESRI, наибольший акцент сделан именно на этой проблеме. Использование этих технологий постепенно входит в уже стандартный набор программных средств, сопоставимое с уровнем использования в УГМС компонент Microsoft Office, и этот процесс будет продолжаться, так как в Российской Федерации практически нет отечественного ПО, равного по уровню коммерческому ПО ArcGIS. Применение ГИС-технологий многократно упрощает обработку разнообразной физико-географической информации, делает ее визуально более доступной для анализа. Однако в целом это не снимает проблем с более глубоким физико-математическим описанием процесса формирования стока в рамках новых средств наблюдений, поступающих в УГМС. Необходимо подчеркнуть, что работы, активно ведущиеся в настоящее время в Гидрометцентре России, связанные с использованием технологии ArcGIS, носят стандартный характер и практически не отличаются от аналогичных работ, выполненных на рубеже 2000 года в рамках EFAS и CHPS.

Многолетний опыт анализа и использования исходной гидрологической информации при разработке методов гидрологических прогнозов показал, что единственной действительно точно измеряемой характеристикой водного режима в любой по водности реке является уровень воды (до 1 см). Точность его измерения существенно превосходит точность измерения расхода воды несмотря на все предпринимаемые усилия, связанные с переходом к принципиально новым методам измерения расходов воды с помощью профилографов. Более того, даже если предположить, что в ближайшие 5–10 лет все УГМС успешно завершат переход на измерения расходов воды с помощью новых измерительных средств – это не снимет постоянно возникающую задачу с построением кривых расходов воды, их экстраполяцией за область реально выполненных измерений и часто возникающей неоднозначности при неустановившемся движении воды.

В [2] выполнен анализ развития гидрологической сети Росгидромета с использованием статистических методов, в основу которых положен линейный корреляционный анализ. При этом практически не анализируется плотность расположения водпостов по длине реки, так как основной упор в этом анализе делается на долгосрочный прогноз притока воды в водохранилище, оцениваемый в виде объема и выраженный в куб. км. В то же время при переходе от концептуальных моделей формирования стока к моделям с распределенными и полураспределенными параметрами большое значение играет плотность данных наблюдений за уровнями воды по длине водотоков. В первую очередь это связано с физически более корректным заданием начальных условий, характеризующих наполнение русла и используемых в численных процедурах интегрирования уравнений

в частных производных, описывающих процесс трансформации стока в рамках гидравлических (гидродинамических) моделей.

В настоящее время на большинстве гидрологических постов Российской Федерации уровень воды измеряется уже полностью в автоматическом режиме с передачей информации по коду КН-15 в центры его обработки. Очевидно, что в этих условиях необходимо, во-первых, расширять сеть наблюдений за уровнем воды как наиболее точно измеряемой характеристикой водного режима, а, во-вторых, стараться развивать те методы краткосрочных гидрологических прогнозов, в которых именно этот вид наблюдений положен в основу физико-математической модели рассматриваемого явления.

В частности, до сих пор в СПН РФ практически ни в одном УГМС не используются для краткосрочных прогнозов водного режима одномерная модель неустановившегося движения воды, представленная системой уравнений Сен-Венана следующего вида:

$$\frac{1}{g} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{1}{g} \frac{\partial \left(\frac{Q^2}{F} \right)}{\partial x} + F \frac{Q|Q|}{K^2} + F \frac{\partial H}{\partial x} = 0, \quad (4)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial F}{\partial t} = q, \quad (5)$$

где x – расстояние по осевой линии потока; t – время; Q – расход воды; F – площадь поперечного сечения ($B=dF/dH$ – ширина русла); q – боковой приток (отток) воды; H – уровень воды; B – ширина верхней части активной площади поперечного сечения; g – ускорение силы тяжести; K – пропускная способность русла (модуль расхода воды). Функция $K(x, H)$ может быть записана в виде $K = (F \times (F/B)^{2/3})/n$, где n – коэффициент шероховатости в формуле Шези-Маннинга. В ряде случаев уравнение движения (4) удобнее представить в следующем виде

$$\frac{1}{g} \frac{\partial \left(\frac{Q}{F} \right)}{\partial t} + \frac{1}{2g} \frac{\partial \left(\frac{Q^2}{F^2} \right)}{\partial x} + \frac{Q|Q|}{K^2} + \frac{\partial H}{\partial x} + q \frac{Q}{gF^2} = 0. \quad (6)$$

Существует большой спектр задач, в которых рассматривается кинематическая и диффузионная модификации модели неустановившегося движения воды, выраженная уравнениями (4) и (6), (5). Многие из них практически реализованы в моделях HEC-RAS (<http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/>) и MIKE 11 (<https://www.tu-braunschweig.de/Medien-DB/geooekologie/mike-11-short-introduction-tutorial.pdf>), активно распространяемых среди стран-членов EFAS и CHPS.

Отметим, что в настоящее время в гидрологических прогнозах наблюдается определенное противоречие. Суть его заключается в том, что

для краткосрочных гидрологических прогнозов используются данные метеорологических прогнозов, полученные в результате реализации сложных глобальных и региональных гидродинамических моделей атмосферы на суперЭВМ с большими затратами машинного времени. В то же время часто сами гидрологические прогнозы базируются на простейших физических закономерностях, которые были получены пятьдесят и более лет назад и не требуют таких вычислительных мощностей. Отчасти именно поэтому ограниченность использования гидравлических моделей даже в Европе и в США в первую очередь связана с большими финансовыми затратами, определяющими подготовку исходной информации для их реализации [14]. В частности, в HEC-RAS и MIKE 11 предусмотрена сложная настройка численной схемы, учитывающей наличие мостов, насыпей, водопоглотительных емкостей вне основного русла, гидротехнических плотин с шлюзами для навигации, а также противопаводковых водохранилищ по основному руслу и основным боковым притокам рассматриваемой речевой сети. Очевидно, что решение обратных задач для исходной системы уравнений неустановившегося движения воды не позволяет полностью восстановить такой объем информации. Однако для большинства рек это практически и не нужно. Определяющим в данном случае является только информация о двумерных морфометрических и гидравлических характеристиках речного русла, что позволяет существенно улучшить трансформационную схему и получить результаты прогноза уровней и расходов воды с любой частотой по длине реки и по времени.

Судя по тому, как развивается применение гидравлических моделей в рамках EFAS и CHPS, ситуацию с их использованием в Российской Федерации в любом случае придется менять, так как требования к качеству прогнозов (прежде всего с точки зрения детальности прогностической информации по длине основного русла, а также по площади водосбора) постоянно возрастают по мере появления новых автоматизированных средств сбора и обработки исходной информации по основным характеристикам водного режима.

Детальных натуральных измерений характеристик русла (таких, как предусмотренные в HEC-RAS и MIKE 11) на существующей гидрометрической сети Росгидромета практически нет, и они не появятся в ближайшей перспективе. Более того, все дноуглубительные работы, проводимые в интересах речного судоходства, практически всегда осуществляются без согласования со структурными организациями Росгидромета, что существенно увеличивает проблематичность перехода структурных организаций Росгидромета на использование современных гидравлических моделей даже в условиях все возрастающего интереса к проблемам развития внутренних водных путей в соответствии с решениями заседания президиума Государственного совета РФ от 15 августа 2016 года.

Единственным реальным способом компенсировать их отсутствие является возможность их восстановления с помощью решения обратных

задач для исходной системы уравнений (4) или (6), (5), что было показано в серии работ, выполненных в нашей стране [8, 9, 12]. Необходимо подчеркнуть, что работы в области реализации подходов по решению обратных задач для системы уравнений (4) или (6), (5) носят уникальный характер и практически не имеют аналогов в развитых зарубежных странах [19]. Из работ данного направления за рубежом можно выделить ряд подходов, связанных с именем Е. Brian Skahill из USACE. Все они посвящены решению ряда вопросов, связанных с определением параметров различных по типу гидрологических моделей с использованием методов регуляризации, применяемых при решении обратных некорректных задач (http://acwc.sdp.sirsi.net/client/en_US/search/asset/1002722, http://acwc.sdp.sirsi.net/client/en_US/search/asset/1000768, http://acwc.sdp.sirsi.net/client/en_US/search/asset/1012721, http://acwc.sdp.sirsi.net/client/en_US/search/asset/1006041).

Опыт реализации разработанных в нашей стране алгоритмов решения обратных задач для Нижней Волги и Иртыша реально показал, что если частоту наблюдений за уровнем воды по длине рек с учетом ввода автоматизированной системы наблюдений увеличить хотя бы в три раза, то тогда задача восстановления характеристик русла решалась бы на другом уровне сходимости решения. Действительно, представляя в соответствии с [8] сглаженные морфометрические ($B(x, H)$; $F(x, H)$) и гидравлические ($K(x, H)$; $n(x, H)$) характеристики русла как функции x и H , представленные в виде разложения в ряд по фиксированным полиномам:

$$F(x_i, H) = \sum_{s=0}^m D_s(x_i) \psi_s(H) \quad (7)$$

$$K^*(x_i, H) = \sum_{d=0}^{m_1} P_d(x_i) \psi_d(H), \quad (8)$$

$$(i = 1, 2, \dots, N),$$

где $K^*(x, H)$ – условное обозначение гидравлических характеристик русла; N – число пунктов наблюдений за уровнем воды; $\psi_\beta(y)$ – полиномы Чебышева ($\beta = s, d$); нетрудно заметить, что обусловленность матрицы плана W относительно неизвестных коэффициентов $D_s(x)$, $P_d(x)$ существенно возрастает за счет более надежного освещения водного режима по длине расчетного участка. Формирование матрицы плана W и определение $D_s(x)$, $P_d(x)$ проводится в результате решения системы линейных алгебраических уравнений следующего вида:

$$(W^*W + \alpha C) \bar{A}_s^\alpha = W^* \bar{U}_s, \quad (9)$$

где W – матрица, транспонированная к матрице плана W ; α – параметр регуляризации; C – трехдиагональная квадратная матрица порядка $m \times N$

при определении $D_S(x)/P_d(x)$; \vec{A}_δ^α – вектор искоемых коэффициентов, соответствующий параметру регуляризации α и точности исходных данных δ ; \vec{U}_δ – вектор правой части порядка Z .

В [8] показано, что наиболее надежный метод решения (9) при $\alpha = 0$, с точки зрения учета погрешностей задания исходной информации, основан на матричной факторизации (сингулярном разложении). Использование сингулярного разложения позволяет легко определить число обусловленности матрицы $M = W^*W$ по соотношению

$$\rho(M) = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\min}}, \quad (10)$$

где σ_{\max} , σ_{\min} – соответственно, максимальное и минимальное сингулярное число W . В том случае, если $\rho(M) > \rho(\Phi)$, считается, что матрица плана Φ менее вырождена по сравнению с матрицей M . Реализация такого подхода позволила численно доказать справедливость перехода в разложениях (7), (8) от уровня воды (H) к глубине (h), позволяющего снизить вырожденность исходных матриц плана и упростить таким образом выбор оптимального параметра регуляризации α_{opt} . Аналогичные процедуры можно выполнить для доказательства снижения вырожденности исходных матриц плана при увеличении освещенности данными наблюдений за уровнями воды по длине расчетного участка.

К сожалению, для большинства рек выполнить это проблематично, так как число водпостов по длине реки крайне ограничено. В то же время внедрение на сети Росгидромета принципиально новых автоматизированных средств измерения уровней воды с одновременным сокращением ручного труда наблюдателей позволяет уже в ближайшем будущем сделать такую процедуру реальной. При этом в перспективе число гидростворов, где проводятся измерения расходов воды, можно было бы существенно сократить при увеличении точности их измерения. При такой постановке задачи определяющим становится сохранение баланса объема воды между входным и замыкающим створами по длине расчетного участка, учитыва-

емого через значение коэффициента $C = (\sum_{j=1}^T Q(0, t_j)) / (\sum_{j=1}^T Q(L, t_j))$, которое

должно стремиться к единице. Здесь $Q(0, t_j)$, $Q(L, t_j)$ – соответственно, расходы воды в момент времени t_j для входного и замыкающего створов;

T – число фиксированных моментов времени, определяющих период открытого русла, для которого проводится оценка коэффициента C . Перспективность такого подхода была численно подтверждена в работе [12], реализующей систему алгоритмов решения обратных задач для исходной системы уравнений мелкой воды (4) или (6), (5) на основе использования

теории нейронных сетей. Технологическая завершенность таких подходов может быть многократно усилена за счет использования оперативной БД наблюдений за уровнями и расходами воды, которые формируются и хранятся в Гидрометцентре России (при условии ее периодического обновления) на основе использования кода КН-15.

Постановка и решение обратных задач для уравнений мелкой воды тесно связана с методами дистанционного сканирования земной и водной поверхности, которые активно применяются в самых различных областях гидрометеорологии (в том числе и гидрологии суши) с конца прошлого века. В частности, дистанционные методы использовались для построения цифровых моделей рельефа поймы рек, прибрежной территории водоемов, для определения уровня воды в водоемах и зоны затоплений, для измерения глубин на мелководьях, а также для решения многих других задач (www.satimagingcorp.com, <https://online.flippingbook.com/view/102059/3>, <http://www.gisa.ru/42486.html>, <http://transputstroy.ru/index.php/lazernoe-skanirovanie>).

Для создания надежной научной основы изучения и прогнозирования процесса формирования стока на основе использования одномерной модели неустановившегося движения воды в условиях сложного, постоянно изменяемого за счет переформирования речного русла необходимо формирование и развитие современной БД сканирования поверхности водосбора. Основными требованиями к такой БД являются:

- 1) сбор, ввод, регистрация и систематизация оперативных периодически обновляемых наборов исходных данных об уровнях воды и отметках линии дна с использованием БПЛА (подповерхностная радиолокация);
- 2) обеспечение географической привязки данных с БПЛА и наземных данных;
- 3) ведение долговременных архивов данных дистанционных и наземных наблюдений;
- 4) обеспечение возможности формирования запросов по любому из численных параметров;
- 5) обеспечение возможности визуализации полученных данных наблюдений.

Предполагается, что БПЛА в первую очередь будут использованы для сбора исходных данных (формирование оперативной БД по уровням воды и отметкам дна русла реки) при построении и верификации параметров гидродинамических моделей процесса формирования стока (в частности его трансформационной составляющей) на сложных по строению участках русел рек. Полученные таким образом модели могут быть использованы в системе оперативных краткосрочных гидродинамических прогнозов водного режима, для долгосрочных прогнозов стока при искусственном и естественном его регулировании, а также для расчетов речного стока (в том числе расчетов, связанных с мероприятиями по уменьшению последствий наводнений).

Применение БПЛА в задачах сбора исходных данных для построения и верификации параметров гидродинамических моделей обусловлено тем, что существующая в России и в большинстве других стран мира сеть гидрометрических и водомерных постов достаточно редка, а данные, которые на них собираются, имеют относительно невысокую точность и низкое разрешение по времени (одни сутки).

Если острота проблемы точности измерения и временного разрешения данных может постепенно снижаться за счет внедрения новых автоматизированных способов измерения, то проблему густоты сети решить очень трудно. Большой проблемой также является то, что в условиях аномально высоких уровней воды точность измерения нередко падает, а в ряде случаев такие измерения становятся просто невозможными. Применение БПЛА – это новый, существенно финансово более доступный способ освоения такой среды, как атмосфера, который позволяет собрать информацию об уровнях воды по всей длине участка за короткое время и определить зону затопления.

Современный мир стоит на пороге действительно революционных преобразований в первую очередь связанных с робототехникой и обслуживающими ее информационными технологиями. БПЛА фактически являются одним из перспективных направлений этого направления.

Заключение

Актуальность исследуемой проблемы определяется необходимостью постоянного совершенствования системы гидрометеорологического обеспечения, неотъемлемой частью которой являются прогнозы водного режима (прежде всего, паводков и половодий), с целью повышения эффективности использования водных ресурсов для экономики Российской Федерации и обеспечения должного уровня гидрометеорологической безопасности населения при искусственном и естественном регулировании стока. При этом постоянно возрастающий объем информации, связанной с развитием региональных и национальных СПН, предполагает необходимость ее тщательного анализа с целью попытки выработки решений и рекомендаций, касающихся создания современной СПН РФ.

С той или иной степенью детальности в работе проанализированы:

- принципы организации обширной сети прогностических организаций Росгидромета;
- технология общедоступного обмена гидрометеорологическими данными между всеми участниками процесса подготовки и выпуска гидрологических прогнозов;
- методологические подходы и решения, определяющие современное состояние СПН и его развитие в Российской Федерации и за рубежом;
- задачи совершенствования системы подготовки и повышения квалификации специалистов в структурных организациях Росгидромета.

Результатом работы является достаточно обширный перечень рекомендаций и адресных ссылок в сети Internet, определяющих научно-методические решения по созданию современной СПН с учетом международного опыта ее создания и эксплуатации. Реализация сформулированных рекомендаций позволит существенно повысить эффективность использования водных ресурсов, многократно снизить экономические потери от наводнений и паводков, а также увеличить уровень обеспечения гидрометеорологической безопасности населения Российской Федерации.

В основу данной работы положен Отчет о научно-исследовательской работе по Государственному контракту от 19 ноября 2012 г. № 9-НИОКР/2-2-2012 по базовому проекту 12фцп-М1-03 «Разработка Рекомендаций по созданию и использованию в оперативной практике методов краткосрочных прогнозов характеристик паводкового стока рек Российской Федерации» (промежуточный). Этап 5 «Подготовить научно-методические решения по организации оперативного автоматизированного краткосрочного прогнозирования паводкового стока различного генезиса», в котором отражена большая часть рассмотренных здесь проблем.

Список литературы

1. *Борщ С.В., Симонов Ю.А., Христофоров А.В.* Система прогнозирования паводков и раннего оповещения о наводнениях на реках Черноморского побережья Кавказа и бассейна Кубани // Труды Гидрометцентра России. 2015. Вып. 356. 248 с.
2. *Борщ С.В., Христофоров А.В.* Оценка качества прогнозов стока // Труды Гидрометцентра России. 2015. Вып. 355. 198 с.
3. *Бураков Д.А.* Математическая модель расчета гидрографа весеннего половодья для равнинных заболоченных бассейнов // Метеорология и гидрология. 1978. № 1. С. 63-71.
4. *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.
5. *Обзор* состояния системы гидрологических наблюдений, обработки данных и подготовки информационной продукции в 2013 году. СПб.: ГГИ, 2014. 39 с.
6. *Обзор* состояния системы гидрологических наблюдений, обработки данных и подготовки информационной продукции в 2014 году. ФГБУ «ГГИ», 2015. 42 с.
7. *Обзор* состояния системы гидрологических наблюдений, обработки данных и подготовки информационной продукции в 2015 году. ФГБУ «ГГИ», 2016. 47 с.
8. *Романов А.В.* Обратные задачи математического моделирования трансформации волн паводков и половодья // Метеорология и гидрология. 2009. № 8. С. 91-99.
9. *Романов А.В.* Особенности разработки методов прогнозов стока с использованием одномерной модели движения воды в русле // Сб. докладов XIV Конференции придунайских стран по гидрологическим прогнозам. Киев, 1988. С. 154-165.
10. *Романов А.В.* Развитие системы прогнозирования наводнений в Российской Федерации. Часть I. Фон и катализаторы изменений // Труды Гидрометцентра России. 2015. Вып. 365. С. 182-195.
11. *Романов А.В.* Структурирование и каталогизация гидрологической библиотеки и архива // Труды Гидрометцентра России. 2016. Вып. 359. С. 178-194.
12. *Романов А.В., Скрибцов П.В., Червоненкис М.А.* Решение обратных задач русловой гидравлики с использованием нелинейных математических моделей // Труды Гидрометцентра России. 2015. Вып. 349. С. 142-160.

13. Фролов А.В., Асмус В.В., Борщ С.В., Вильфанд Р.М., Жабина И.И., Затыгалова В.В., Кровотынцев В.А., Кудрявцева О.И., Леонтьева Е.А., Симонов Ю.А., Степанов Ю.А. “ГИС АМУР”: Система мониторинга, прогнозирования и раннего оповещения о наводнениях // *Метеорология и гидрология*. 2016. № 3. С. 5-21.

14. Adams T.E., Pagano T.C. Flood Forecasting – A Global Perspective. Academic Press, 2016. 480 p.

15. Bartholmes J., Thielen J., Kalas M. Forecasting medium-range flood hazard on European scale // *Georisk: Assessment and management of risk for engineered systems and geohazards*. December 2008. Vol. 2. No. 4. P. 181-186. <http://dx.doi.org/10.1080/17499510802369132>.

16. *Guide to Hydrological Practices*. Volume II. Management of Water Resources and Application of Hydrological Practices // WMO-№ 168. Geneva, 2009. 668 p.

17. Knijff J.V. V.D., Younis J., Roo A.P.J.D. LISFLOOD: a GIS-based distributed model for river basin scale balance and flood simulation // *International Journal of Geographical Information Science*. 2010. Vol. 24, No 2. P. 189-212. <http://dx.doi.org/10.1080/13658810802549154>.

18. Manual on Flood Forecasting and Warning // WMO-No. 1072. 2011. 138 p.

19. Jeppson R.W. Open channel flow. Numerical methods and computer application. CRC Press (Taylor & Francis Group), 2011. 1227 p.

References

1. Borsch S.V., Simonov Yu.A., Khristoforov A.V. Sistema prognozirovaniya pavodkov i rannego opoveshcheniya o navodneniyakh na rekakh Chernomorskogo poberezh'ya Kavkaza i basseina Kubani [Flood forecasting and early warning system for rivers of the Black Sea shore of Caucasian region and the Kuban river basin]. *Trudy Gidromettsentra Rossii* [Proceedings of Hydrometcenter of Russia], 2015, vol. 356, 248 p.

2. Borsch S.V., Simonov Yu.A., Khristoforov A.V. Otsenka kachestva prognozov stoka [Hydrologic flow forecast verification]. *Trudy Gidromettsentra Rossii* [Proceedings of Hydrometcenter of Russia], 2015, vol. 355, 198 p.

3. Burakov D.A. Matematicheskaya model' rascheta gidrografa vesennego polovod'ya dlya ravninnykh zabolochennykh basseinov. *Russian Meteorology and Hydrology*, 1978, no. 1, pp. 63-71.

4. Vil'fand R.M., Rivin G.S., Rozinkina I.A. Mesoscale weather short-range forecasting at the Hydrometcenter of Russia, on the example of COSMO-Ru. *Russian Meteorology and Hydrology*, 2010, vol. 35, no. 1, pp. 1-9.

5. *Obzor sostoyaniya sistemy gidrologicheskikh nablyudenii, obrabotki dannykh i podgotovki informatsionnoi produktsii v 2013 godu*. St. Petersburg, State Hydrological Institute Publ, 2014, 39 c.

6. *Obzor sostoyaniya sistemy gidrologicheskikh nablyudenii, obrabotki dannykh i podgotovki informatsionnoi produktsii v 2014 godu*. St. Petersburg, State Hydrological Institute Publ, 2015, 42 c.

7. *Obzor sostoyaniya sistemy gidrologicheskikh nablyudenii, obrabotki dannykh i podgotovki informatsionnoi produktsii v 2015 godu*. St. Petersburg, State Hydrological Institute Publ, 2016, 47 c.

8. Romanov A.V. Inverse problems in mathematical modeling of flood waves routing. *Russian Meteorology and Hydrology*, 2009, vol. 34, no. 8, pp. 549-555.

9. Romanov A.V. Osobennosti razrabotki metodov prognozov stoka s ispol'zovaniem odnomeranoi modeli dvizheniya vody v rusle. *Sb. dokladov XIV Konferentsii pridunaiskikh stran po gidrologicheskim prognozam*, Kiev, 1988, pp. 154-165.

10. Romanov A.V. Razvitie sistemy prognozirovaniya navodnenii v Rossiiskoi Federatsii. Chast' I. Fon i katalizatory izmenenii [Development of flood forecasting system in Russia. Part I. Background and catalysts for change]. *Trudy Gidromettsentra Rossii* [Proceedings of Hydrometcenter of Russia], 2017, vol. 365, pp. 55-65.

11. Romanov A.V. Strukturirovanie i katalogizatsiya gidrologicheskoi biblioteki i arkhiva [Structuring and cataloging of Hydrological Library and Archives]. *Trudy Gidromettsentra Rossii* [Proceedings of Hydrometcenter of Russia], 2016, vol. 359, pp. 178-194.

12. Romanov A.V., Skribtsov P.V., Chervonenkis M.A. Reshenie obratnykh zadach ruslovoi gidravliki s ispol'zovaniem nelineinykh matematicheskikh modelei [Solution of inverse problems of riverbed hydraulics using nonlinear mathematical models]. *Trudy Gidromettsentra Rossii* [Proceedings of Hydrometcenter of Russia], 2016, vol. 349, pp. 142-160.
13. Frolov A.V., Asmus V.V., Zatyagalova V.V., Krovotyntsev V.A., Borshch S.V., Vil'fand R.M., Zhabina I.I., Kudryavtseva O.I., Leont'eva E.A., Simonov Y.A., Stepanov Y.A. GIS-Amur system of flood monitoring, forecasting, and early warning. *Russian Meteorology and Hydrology*, 2016, vol. 41, no. 3, pp. 157-169.
14. Adams T.E., Pagano T.C. Flood Forecasting – A Global Perspective. Academic Press Publ., 2016, 480 p.
15. Bartholmes J., Thielen J., Kalas M. Forecasting medium-range flood hazard on European scale. *Georisk: Assessment and management of risk for engineered systems and geohazards*. December 2008, vol. 2, no. 4, pp. 181-186, available at: <http://dx.doi.org/10.1080/17499510802369132>.
16. *Guide to Hydrological Practices*. Volume II. Management of Water Resources and Application of Hydrological Practices. WMO-№ 168, Geneva, 2009, 668 p.
17. Knijff J.V. V.D., Younis J., Roo A.P.J.D. LISFLOOD: a GIS-based distributed model for river basin scale balance and flood simulation. *Int. J. Geograph. Inform.Sci*, 2010, vol. 24, no 2, pp. 189-212, available at: <http://dx.doi.org/10.1080/13658810802549154>.
18. *Manual on Flood Forecasting and Warning*. WMO-No. 1072, 2011, 138 p.
19. Jeppson R.W. Open channel flow. Numerical methods and computer application. CRC Press (Taylor & Francis Group), 2011, 1227 p.

Поступила в редакцию 10.07.2017 г.

Received by the editor 10.07.2017.