

**Секция IV. РАЗРАБОТКА МЕТОДОЛОГИИ И ТЕХНОЛОГИЙ  
УПРАВЛЕНИЯ РИСКОМ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ  
ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ РАЗЛИЧНОГО ГЕНЕЗИСА  
В УСЛОВИЯХ МЕНЯЮЩЕГОСЯ КЛИМАТА И  
АНТРОПОГЕННОЙ НАГРУЗКИ  
НА ВОДНЫЕ ОБЪЕКТЫ И ВОДОСБОРЫ**

**СИСТЕМА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ И РАННЕГО  
ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ ОБ УГРОЗЕ НАВОДНЕНИЙ  
НА РЕКАХ БАССЕЙНА р. АМУР**

Борщ С.В.<sup>1</sup>, Бураков Д.А.<sup>2</sup>, Жабина И.И.<sup>1</sup>,  
Леонтьева Е.А.<sup>1</sup>, Симонов Ю.А.<sup>1</sup>, Степанов Ю.А.<sup>1</sup>,  
Христофоров А.В.<sup>1,3</sup>, Юмина Н.М.<sup>1,3</sup>

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

<sup>2</sup>Красноярский государственный аграрный университет,  
г. Красноярск

<sup>3</sup>МГУ имени М.В. Ломоносова, Географический факультет,  
г. Москва

simonov@mecom.ru

**Введение.** Последние несколько десятилетий ознаменовались интенсивным развитием наблюдательных средств за параметрами окружающей среды – автоматизированные технологии сбора, передачи и мониторинга данных внедряются повсеместно и позволяют получить детальное представление о состоянии природных объектов. Такие системы [6] отличаются полной или частичной автоматизацией, содержанием сложных расчетных и прогнозных схем, а также развитым компонентом подготовки информационно-аналитической и прогностической продукции для последующего принятия эффективных управленческих решений, нацеленных на снижение ущерба от природных бедствий. Наводнения на реках, без сомнения, относятся к наиболее опасным стихийным бедствиям. Согласно выводам экспертов ООН по исследованию рисков природных бедствий [7], наводнения на реках занимают лидирующую позицию среди всех природных бедствий с точки зрения экономического ущерба и угрозы человеческим жизням. Последние данные свидетельствуют об учащении случаев экстремальных наводнений

во многих регионах земного шара, в том числе и в России. В связи с этим в последнее десятилетие в Гидрометцентре России проводятся исследования по созданию и внедрению в оперативную практику автоматизированных систем гидрологического прогнозирования (СПН). В статье представлена структура, основные компоненты и особенности реализации автоматизированной системы краткосрочного гидрологического прогнозирования, разработанной для выпуска краткосрочных прогнозов паводкового стока на реках бассейна р. Амур – СПН «АМУР».

**Архитектура СПН.** Типовая структурная схема системы СПН отражает общий вид схемы выпуска краткосрочных прогнозов. Система состоит из трех основных компонентов: информационного, вычислительного и визуализации и доведения прогнозов до пользователей. Представленная структура является обобщенной – каждый из компонентов включает в себя ряд блоков, функционал которых направлен на выполнение тематических задач. Рассматриваемые компоненты схемы в том или ином виде присутствуют во всех СПН, однако их конфигурация и характеристики могут значительно различаться. Информационный компонент представляет собой информационную основу системы – он аккумулирует в себе все исходные оперативные гидрометеорологические данные, необходимые для составления и выпуска краткосрочных прогнозов паводкового стока, а также непосредственно результаты прогнозирования. Вычислительный компонент является расчетным ядром системы прогнозирования. Он включает в себя процедуры гидрологического прогнозирования, а также коррекцию прогнозов расходов (уровней) воды. Блок визуализации и доведения прогнозов до конечных пользователей включает процедуры графического представления прогностической информации в удобном виде, а также их передачи пользователям с помощью современных средств связи.

**Информационная основа прогнозирования.** Информационное обеспечение СПН «АМУР» определялось требованием методик краткосрочного гидрологического прогнозирования (см ниже), реализованных в рамках СПН, и включило в себя наблюдения за водным режимом рек бассейна р. Амур, наблюдением на синоптических станциях, данными наблюдений за снежным покровом и метеорологическим прогнозом температур воздуха и осадков. Процесс оперативного информационного обеспечения является комплексным и сложным ввиду разнообразия типов, номенклатуры и харак-

теристик исходной информации (различное время поступления данных, разный временной шаг измерений и др.), большого объема поступлений, возможных пропусков в поступлении данных и т.д.

В связи с этим процесс информационного обеспечения СПН «АМУР» является многокомпонентным – при его решении были задействованы программно-вычислительные ресурсы системы информационного обеспечения ГМЦ РФ, которая развивается на протяжении последних 30 лет [5]. Основными составляющими информационного блока СПН «АМУР» являются оперативная гидрометеорологическая бассейновая база данных (БД), база данных для визуализации, а также средства управления потоком данных.

Бассейновая БД СПН «АМУР» состоит из трех наборов данных прямого доступа (файлов), используемых для хранения описаний типов записей, экземпляров записей разных типов и системной информации. Размещение и доступ к экземплярам записи в бассейновой БД осуществляется с помощью программ, входящих в состав библиотеки системы СУБД. Для управления потоками исходной гидрометеорологической информации используются технологический комплекс ПРОМЕТЕЙ [3] и автоматизированная технология АСООИ Гидрометцентра России [5]. Круглосуточно в автоматическом режиме выполняется: сбор и контроль поступающей первичной информации, обработка (раскодирование) информации, накопление информации в бассейновой БД и БД визуализации, обеспечение доступа к информации, заполнение пропусков в случае отсутствия входной информации.

**Прогноз уровней воды и притока воды к Зейскому водохранилищу.** Для построения методик прогноза уровней воды на р. Амур использовались суточные данные наблюдений за уровнем воды на 16 постах сети Росгидромета, расположенных непосредственно на реке Амур, и на 2 постах, расположенных в замыкающих створах основных притоков Амура – реках Зея и Уссури. В расчетах были использованы данные за период с 2008 по 2010, 2013 гг., включающие как маловодный год (2008), так и многоводные годы (2009, 2013). Способы получения прогнозных связей различались в зависимости от условий формирования стока на конкретном участке реки.

На бесприточных или слабoprиточных участках реки уровень воды  $H_H(t + \tau)$  в нижнем створе на момент времени  $t + \tau$  прогнозируется по его статистической связи со значением уровня в верх-

нем створе  $H_B(t)$ , соответствующего той же фазе прохождения паводка, и от значения уровня воды в нижнем створе  $H_H(t)$  за предшествующий момент времени  $t$ , характеризующего инерционный прогноз. При этом время добегания соответственных уровней воды на данном участке  $\tau$  рассчитывается по его зависимости от  $H_B(t)$ .

При наличии значительного притока его водность учитывается дополнительно, а схема прогноза усложняется [4]. Для двух выбранных участков использована прогностическая зависимость вида:

$$H_H(t) = a_0 + a_1 H_B(t - \tau_1) + a_2 H_H(t - \tau_1) + a_3 H_{II}(t - \tau_2), \quad (1)$$

где  $H_B$  – уровень воды на верхнем посту,  $H_H$  – уровень воды на нижнем посту,  $H_{II}$  – уровень воды на притоке,  $\tau_1$  – расчетное время добегания от верхнего поста до нижнего поста,  $\tau_2$  – расчетное время добегания от поста на притоке до нижнего поста,  $a_i$  – коэффициенты, определяемые методом наименьших квадратов. Зависимость такого вида учитывает не только колебания уровней воды на верхних постах основной реки и притока, но и содержит в себе инерционный прогноз. Погрешность методики прогноза уровней воды оценивалась на независимом материале для 15 створов р. Амур [4]. Для этого с использованием рассчитанных параметров зависимостей выпускались проверочные прогнозы уровня для лет, данные которых не использовались для расчета параметров прогностических зависимостей. Показатели качества разработанных методик [1] позволяют использовать их для выпуска оперативных прогнозов уровня воды на гидрологических постах Амура.

Для осуществления выпуска краткосрочных прогнозов притока воды в Зейское водохранилище адаптирована концептуальная модель формирования стока на водосборе водохранилища [2]. Модель состоит из подмоделей, в блоках которых для высотных зон каждого района проводятся расчеты снегонакопления, снеготаяния, водоотдачи талой и дождевой воды, склонового притока и руслового добегания. Модель использует как метеорологическую информацию, так и данные наблюдений за уровнями воды в речной системе. Запасы воды в руслах рассчитываются по наблюдениям ежедневных уровней за 8 и 20 час. Влияние русловых запасов на прогнозируемый расход (уровень) возрастает вниз по течению реки.

Отрезки времени, в течение которых суточное поступление воды на поверхность бассейна превышает суточное испарение и про-

сачивание, образуют последовательные паводкообразующие периоды. Для каждых суток паводкообразующего периода рассчитывается водоотдача высотных зон по схеме Е.Г. Попова. В качестве показателей увлажнения на момент начала дождя использовался уровень воды одного из притоков, либо индекс предшествующих осадков.

В основе подмодели динамичной составляющей склонового притока в русловую сеть  $q(t)$  лежит концепция динамичного (гравитационного) запаса воды  $W(t)$  на склонах, связанного с  $q(t)$  в общем случае не линейно [2]:

$$W(t+1) = W(t) + \varphi(t) \cdot (h - Z - I)_{t+1} - q(t+1) \quad (2)$$

$$q(t) = \alpha \{0.50[W(t+1) + W(t)]\}^p \quad (3)$$

где  $t$  – время;  $\varphi(t)$  – относительная действующая площадь, в пределах которой происходит пополнение динамичного запаса воды (изменяется от нуля в состоянии высыхания бассейна, до  $(1-\omega)$  при насыщении почвы водой);  $\omega$  – доля постоянно бессточной площади в бассейне;  $h$  – слой подачи дождевой (талой) воды за расчётный интервал;  $Z$  – испарение;  $I$  – впитывание, связанное с пополнением базисного стока и определяемое по расходу воды  $Q_{\min}$  в конце кривой истощения ( $I = 86.4 Q_{\min} / F$ , мм/сут);  $\alpha$  – переменный коэффициент, учитывающий гидравлические условия и другие факторы;  $p$  – показатель степени (в первом приближении  $p=1$ );  $F$  – площадь водосбора.

В период поступления воды на водосбор  $\varphi(t)$  определяется по ёмкостной модели водопоглощения Е.Г. Попова, параметр поглощения дождевых или талых вод (максимальные потери) – по эмпирической зависимости от косвенных показателей предшествующего увлажнения бассейна. В период истощения склонового стока, когда  $(h - Z - I)_t < 0$ , учитывается процесс снижения действующей площади  $\varphi(t)$  по мере истощения запасов воды на склоне. Русловая трансформация склонового притока рассчитывается с помощью интеграла свертки

$$Q(t + \Delta t) = \left[ \sum_{i=1}^n \int_0^{\Delta t} q_i(t + \Delta t - \tau) f_{q_i}(\tau) d\tau \right] + Q_w(t + \Delta t) + Q_{\min}, \quad (4)$$

где  $Q(t + \Delta t)$  – расход воды в замыкающем створе;  $t$  – дата выпуска прогноза;  $\Delta t$  – заблаговременность прогноза;  $n$  – число ландшафтно-гидрологических районов, на которые разбит речной бассейн;  $q_i(t)$  –

суммарный приток в русловую сеть с  $i$ -ого района;  $f_{q_i}(\tau)$  – кривая добегающего бокового притока с  $i$ -ого района (функция влияния), рассматриваемая как плотность распределения времени добегающего элементарных объемов воды в гидрологической системе [2, 4];  $Q_w(t+\Delta t)$  – составляющая расхода воды, обусловленная истощением начального (на момент  $t$ ) запаса воды в русловой сети;  $Q_{\min}$  – устойчивое (базисное) питание реки.

Выразив запас воды в русловой сети в зависимости от высот уровней воды  $H_i(t)$  в пунктах наблюдений речной системы, получим следующее уравнение [2]:

$$Q(t+\Delta t) = [c_0 \sum_0^{\Delta t} \int q_i(t+\Delta t-\tau) f_{q_i}(\tau) d\tau + \sum c_i (H_i(t) - H_{\min})^{y_1} + \sum c_{i+n} (H_i(t) - H_i(t-1))^{1/y_2} + Q_{\min}] \quad (5)$$

где:  $Q(t+\Delta t)$  – прогнозируемый расход (уровень) воды в замыкающем створе (или приток воды в водохранилище);  $c_i, y_1, y_2$  – коэффициенты;  $H_{i \min}$  – минимальный уровень воды в  $i$ -том пункте речной системы, принятый за условный нуль отсчета;  $Q_{\min}$  – то же в замыкающем створе. Параметры формул отдельных блоков модели определяются методами оптимизации и линейной регрессии.

**Доведение прогнозов до конечных пользователей.** Компонент подготовки прогностической продукции СПН «АМУР» на основе использования ГИС-технологий в автоматическом режиме формирует карты фактической и прогностической гидрологической обстановки на реках бассейна р. Амур, ход уровней воды на гидрологических постах и притока воды в водохранилище, а также табличную информацию. Подготовленная информация поступает потребителям прогнозов по сети Интернет.

### Литературы

1. *Бориц С.В., Симонов Ю.А., Христофоров А.В., Юмина Н.М.* Краткосрочное прогнозирование уровней воды на реке Амур // Труды Гидрометцентра России. – 2015. – Вып. 357. – С. 104–121.
2. *Бураков Д.А., Кареева Е.Д., Шайдулов В.В.* Математическое моделирование стока: теоретические основы, современное состояние, перспективы // Вестник Крас. ГУ. – 2006. – № 4. – С. 3–19.
3. *Пурина И.Э., Жабина И.И., Недачина А.Ю., Дегтярева Н.В., Маковская И.В.* Развитие информационных технологий в локальной

сети CRAY // 80 лет Гидрометцентру России. – М., ТРИАДА ЛТД – 2010. – С. 423-434.

4. Руководство по гидрологическим прогнозам. Вып. 2. Краткосрочный прогноз расхода и уровня воды на реках. – Л.: Гидрометеиздат, 1989. – 245 с.

5. Степанов Ю.А., Жабина И.И. Новая версия автоматизированной технологии АСООИ на выделенном сервере Гидрометцентра России // М.: Труды Гидрометцентра России. –2011. – Вып. 346. - С. 146-169.

6. *Golnaraghi M.* Institutional Partnerships in Multy-Hazards Early Warning Systems: A compilation of Seven National Good Practices and guiding Principles. Springer, 2012 – 350 p.

7. Manual on Flood Forecasting and Warning. // World Meteorological Organization - No. 1072, Geneva, 2011. –138 p.

**ПОСТРОЕНИЕ ИНТЕГРИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ  
ГИДРОЛОГИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ  
С ПРИМЕНЕНИЕМ СТАНДАРТА OpenMI  
ДЛЯ ЗАДАЧ УПРАВЛЕНИЯ РИСКОМ НАВОДНЕНИЙ  
(на примере среднего Амура)**

Бугаец А.Н.<sup>1,2</sup>, Мотовилов Ю.Г.<sup>3</sup>, Беликов В.В.<sup>3</sup>, Гельфан А.Н.<sup>3</sup>,  
Гончуков Л.В.<sup>4</sup>, Дод Е.В.<sup>5</sup>, Калугин А.С.<sup>3</sup>, Крыленко И.Н.<sup>3,4</sup>,  
Морейдо В.М.<sup>3</sup>, Норин С.В.<sup>3</sup>, Румянцев А.Б.<sup>3</sup>, Сазонов А.А.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, г. Владивосток

<sup>2</sup>Дальневосточный региональный научно-исследовательский  
гидрометеорологический институт, г. Владивосток

<sup>3</sup>Институт водных проблем РАН, г. Москва

<sup>4</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

<sup>5</sup>ОАО «РусГидро», г. Москва

hydrowpi@mail.ru

Возможности повышения эффективности управления риском наводнений – осуществления мер, позволяющих минимизировать наносимый наводнениями социально-экономический и экологический ущерб, – связаны, в значительной степени, с развитием методов оценки опасности, риска и возможных размеров будущих наводнений с учетом природных и антропогенных изменений, повышением заблаговременности и точности прогнозов формирования и