Н.Н. Красногорская, Ю.И. Ферапонтов, Э.В. Нафикова

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ДЛЯ ЗАДАЧ УПРАВЛЕНИЯ ВОДНЫМИ РЕСУРСАМИ

N.N. Karsnogorskaya, Yu.I. Ferapontov, E.V. Nafikova

MODEL BUILDING FOR THE FORECAST OF THE HYDROLOGICAL PROCESSES FOR WATER RESOURCE MANAGEMENT

Разработана комплексная модель прогноза гидрологических процессов в условиях изменяющегося климата и антропогенной нагрузки с помощью элементов искусственного интеллекта (искусственных нейронных сетей и генетического алгоритма). Выявлены значимые входные параметры для прогноза гидрологических ситуаций на водотоке.

Модели прогнозирования гидрологических показателей апробированы на примере р. Белой.

Ключевые слова: экстремальные гидрологические ситуации, искусственные нейронные сети, генетический алгоритм, прогнозирование.

The forecasting model for the extreme hydrological situations in changing climate condition and anthropogenic loading is developed by the means of artificial intelligence like neural network and genetic algorithm. Significant input parameters for the forecast of hydrological situations on a waterway by means of genetic algorithms are revealed. It was applied to predict hydrological parameters for the Belaya River.

Keywords: extreme hydrological situations, artificial neural networks, genetic algorithm, predicting.

Введение

На Всемирном саммите по устойчивому развитию в Йоханнесбурге в сентябре 2002 г. объявлено о начале существования Глобальной водной инициативы: «Вода для жизни – здоровье, благополучие, экономическое развитие и безопасность». Концепция и принципы Интегрированного Управления Водными Ресурсами (ИУВР) являются ключевыми для устойчивого развития. Федеральная целевая программа «Развитие водохозяйственного комплекса Российской Федерации в 2012-2020 годах» и водная стратегия Российской Федерации до 2020 г. ориентированы на водоресурсное обеспечение социально-экономического развития страны за счет повышения рациональности использования водных ресурсов.

В этой связи обоснование и выполнение комплексной оценки и прогнозирования состояния водных ресурсов для интегрированного управления водными ресурсами представляет собой важную в научном и практическом отношении задачу.

Объект исследования и исходные данные

Объектом исследования является река Белая – крупнейшая водная артерия Республики Башкортостан, приток р. Волги II-го порядка. Река Белая протекает через все крупные промышленные центры Башкортостана и служит источником водоснабжения многих городов и поселков, расположенных вдоль ее берегов.

Исходными данными для прогнозирования гидрологических показателей являлись:

– данные наблюдений за метеорологическими показателями, водным режимом р. Белой Башкирского территориального управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Баш.УГМС);
– параметры вращения Земли по данным Международной службы вращения Земли (International Earth Rotation and Reference System Service); эфемериды Солнца и Луны;
– параметры звездного времени, представленные в «Астрономических ежегодниках», издаваемых Российской Академией наук;
– аргументы для расчета астрономических показателей по данным обзора резолюций Генеральной Ассамблеи Международного астрономического союза (МАС) и данным обзора решений Генеральных Ассамблей Международного геодезического и геофизического союза.

Расчет астрономических показателей проводился по формулам, представленным в монографии [Сидоренков Н.С., 2002].

Отбор данных по гидрологическим и метеорологическим показателям р. Белой проводился для 4 пунктов: г. Белорецк (в черте д/о Арский камень), г. Стерлитамак, г. Уфа, г. Бирск (рис. 1).

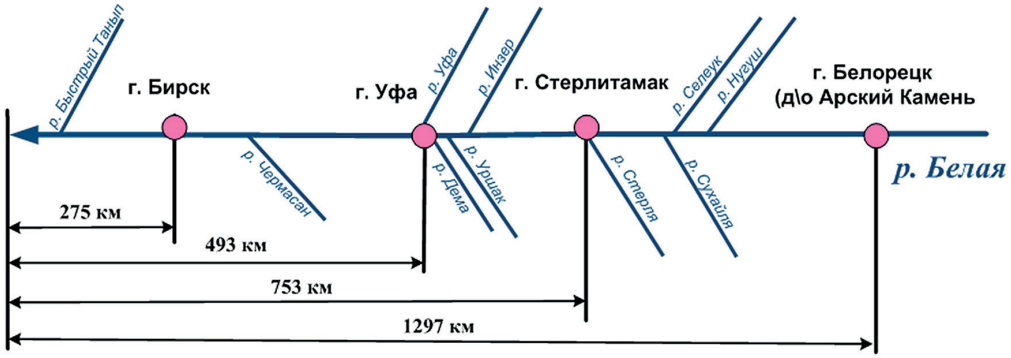

Рис. 1. Схема расположения гидрометрических постов на реке Белой (стрелкой показано направление течения реки).

Сложности прогнозирования экстремальных гидрологических ситуаций с помощью элементов искусственного интеллекта

При разработке модели прогноза ЭГС существующими методами математического моделирования, как показал анализ литературных источников [Георгиевский Ю.М.,

Шаночкин С.В. 2007; Леонов Е.А., 2010; Красногорская Н.Н. и др., 2010], учет всех факторов, влияющих на условия формирования режима водных объектов, сложен и трудоемок.

Методы элементов искусственного интеллекта, в частности искусственные нейронные сети (ИНС), обладают способностью в ряду квазициклических данных (таких как гидрологических) учитывать скрытые периодичности и строить алгоритмы обработки информации (уникальная способность обучаться на примерах и «узнавать» в потоке «зашумленной» и противоречивой информации характер ранее встреченных образов и ситуаций) [Maier, H.R., Dandy, G.C., 2006, Хайкинг С., 2006], что приобретает исключительную важность при прогнозировании количественных и качественных характеристик водных объектов, обусловленных региональными природными, антропогенными, климатическими особенностями территории.

При разработке модели прогноза экстремальных гидрологических ситуаций (ЭГС) возникает ряд проблем. Предложенные в настоящей работе решения проблем иллюстрируются блок-схемой, приведенной на рис. 2.

Рис.2. Проблемы и решения прогнозирования экстремальных гидрологических ситуаций с помощью искусственных нейронных сетей.

Для учета особенностей формирования гидрологического режима водотока в каждый период водности (п.1 рис. 2) предлагается разделение комплексной модели прогноза гидрологических процессов на отдельные для каждого периода водности. Для определения дат наступления и окончания гидрологических периодов водности (границ моделей для каждого периода водности) предложено прогнозировать даты наступления характерных явлений водного режима с помощью ИНС.

Сложности, связанные с изменением входных переменных прогнозной модели из-за изменения гидрологических показателей под действием изменения климата и антропогенной нагрузки (п.2 рис. 2), предложено решать путем определения оптимального объема обучающей выборки методом «кривых обучения» с помощью ИНС.

В настоящей работе впервые для определения значимых входных гидрологических, метеорологических и астрономических параметров, в т.ч. зашумленных или слабо коррелирующих (п.3 рис. 2), предложено использовать генетический алгоритм.

Для прогнозирования расходов воды при экстремальных гидрологических ситуациях предлагается использовать искусственные нейронные сети, способные учитывать скрытые и запаздывающие влияния большого числа входных переменных (пп.4 и 5 рис. 2).

Определение размера и достаточности обучающей выборки входных переменных для прогнозирования гидрологических показателей

Для определения размера и достаточности обучающей выборки входных переменных при изменении гидрологических показателей под действием изменения климата и антропогенной нагрузки, а также для оценки оптимальности размера нейронной сети при прогнозировании расходов воды применена теория «кривых обучения». Данная теория заключается в интер- и экстраполяции графиков ошибок обучения, построенных по размеру обучающей выборки (а также в поиске областей минимумов и взаимных асимптотических приближений ошибок обучения и обобщения.

Вариации ошибок обучения и обобщения моделирования ежедневных расходов при изменении объема обучающей выборки от 365 до 13 505 (ежедневные данные от 1 года до 37 лет) графически интерпретированы на рис. 3.

Приоритетным критерием отбора оптимального размера обучающей выборки исходных данных в данном случае является ошибка обобщения, определяющая способность сети к прогнозированию.

Оптимальный размер обучающей выборки, при котором достигается минимум ошибки обобщения (при удовлетворительной ошибке обучения), составляет 4015 суток (11 лет с 1997 по 2007 г.).

Прогнозирование дат, определяющих продолжительность фаз водного режима

Для прогноза дат наступления различных гидрологических явлений проводился отбор дат: начала и конца половодья; максимума половодья; начала осенне-летней межени; начала зимней межени. Прогнозирование проводилось по четырем контрольным створам р. Белая за период 1961-2008 гг., которые послужили входными параметрами для обучения ИНС в программе Statistica 7.0 Neural Networks с последующим прогно-

зом и верифицированием данных на 2008, 2009 и 2010 гг. Протестировано и обучено более 10000 моделей. По анализу топологии протестированных сетей отобрана обобщенно-регрессионная сеть (GRNN).

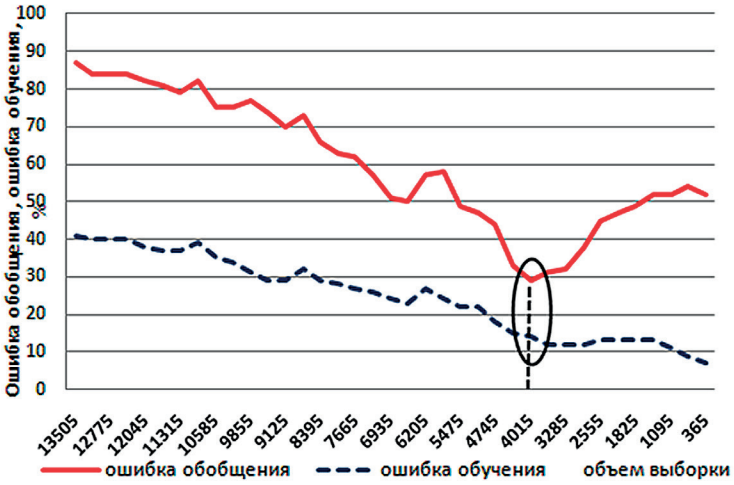

Рис. 3. Зависимость ошибок обучения и обобщения от объема обучающей выборки при прогнозировании расходов воды р.Белая в створе г. Уфа.

Результаты прогноза дат наступления характерных гидрологических явлений с помощью ИНС сравнивались с результатами прогноза вероятностно-статистическим (ВС) методом. Сравнительная оценка ошибок прогнозирования дат наступления ЭГС вероятностно-статистическим методом и с помощью искусственных нейронных сетей для р. Белой створа г. Уфа на 2008 г. представлена в табл. 1.

Таблица 1

Сравнительная таблица относительных ошибок прогноза дат наступления характерных гидрологических явлений с помощью ИНС и ВС метода для створа р.Белая – г. Уфа

Параметры	Относительная ошибка ВС метода, %	Относительная ошибка прогноза ИНС, %	Абсолютная ошибка между относит. ошибками ВС метода и ИНС, %
Дата начала половодья	20	16	4
Дата конца половодья	13	15	5
Дата максимума половодья	12	12	0
Дата начала зимней межени	22	17	5
Дата конца осенне-летней межени	16	17	1

Относительные ошибки прогноза с помощью ИНС и ВС метода различаются незначительно (от 0 до 5 %), что свидетельствует о возможности использования для прогноза дат наступления гидрологических явлений, как статистического метода, так и ИНС. Однако, использование ИНС метода уменьшает трудоемкость процесса, сокращает время прогнозирования гидрологических характеристик.

Отбор значимых входных параметров для прогнозирования экстремальных гидрологических ситуаций

Для повышения достоверности прогнозирования гидрологических характеристик за счет учета природы процессов и учета значимых параметров, влияющих на гидрологический режим, проведен отбор значимых входных метеорологических, астрономических и гидрологических параметров прогнозной модели.

В настоящей работе впервые апробировано применение генетического алгоритма (ГА) для отбора и ранжирования значимых гидрометеорологических и астрономических входных параметров нейронных сетей в разные фазы водного режима с целью последующего прогнозирования расходов воды р. Белой.

С помощью ГА в программе Statistica 7.0 из заданных (входных) выявлены и проранжированы наиболее значимые параметры для расхода воды в период половодья, осенне-летней и зимней межени (табл. 2).

Установлено, что наиболее значимыми параметрами для прогнозирования расходов воды в период половодья являются: максимальные запасы воды в снеге, температура воздуха, осадки, осеннее увлажнение почвы, глубина промерзания почвы. Для периода половодья в числе значимых для прогноза расхода воды р. Белой астрономические параметры не отобраны, в следствии слабой корреляции гидрологических характеристик с данными астрономических параметров и преобладающим влиянием в этот период метеорологических параметров.

Для периода осенне-летней и зимней межени ГА значимыми для прогноза расходов воды р. Белой отобраны:

– гидрометеорологические показатели: температура воздуха, количество осадков, температура воды;
– астрономические параметры: высота статического прилива, приливной потенциал и расход лучистой энергии.

Наиболее значимыми входными параметрами для прогнозирования расходов воды в каждую фазу водного режима являются температура воздуха и осадки.

Отобранные ГА значимые для экстремальных гидрологических ситуаций показатели с учетом рассчитанного ранее оптимального объема обучающей выборки (4015 суток) использованы в качестве входных параметров прогнозной модели искусственных нейронных сетей в программе Statistica 7,0.

Обученная нейронная сеть затем использована для краткосрочного прогнозирования расходов речной воды на 2008 г и среднесрочного и долгосрочного прогнозирования расходов воды на 2009 и 2010 гг. (т.е. данные 2008, 2009 и 2010 гг. использованы в качестве контрольных выборок для валидации модели).

Таблица 2

Результаты отбора и ранжирования генетическим алгоритмом входных параметров для прогнозирования расходов воды р. Белая – г. Уфа

Фазы водного режима / Входные / выходные параметры	Половодье	Осенне-летняя межень	Зимняя межень
Скорость течения	-	-	-
Температура воздуха	2	2	3
Количество осадков	3	1	1
Температура воды	6	3	2
Глубина промерзания почвы	5	-	4
Макс. запасы воды в снеге	1	-	-
Осеннее увлажнение почвы	4	-	-
Приливной потенциал	-	6	-
Высота статического прилива	-	5	5
Геоцентрическое расстояние	-	-	-
Фаза Луны	-	-	-
Склонение Луны	-	-	-
Гелиоцентрическое расстояние	-	-	-
Расход-приход лучистой энергии	-	4	-
Склонение Солнца	-	-	-
Угловая скорость вращения Земли	-	-	-
Изменение географ координаты местности	-	-	-

*1-наиболее значимый параметр,...n – наименее значимый параметр.

Для примера результаты сопоставления прогнозных и фактических значений расходов воды на 2008 г. графически интерпретированы на рис. 4.

Анализ валидации модели показал, что относительная ошибка прогнозирования расходов воды р. Белой в створе г. Уфа не превышает 34 %, что показывает высокую степень достоверности прогноза гидрологических ситуаций с помощью ИНС.

В работе выполнен также прогноз ежедневных и экстремальных значений расходов воды реки Белая в створе г. Уфа на 2012 и 2013 гг. для апробации моделей прогноза в БашУГМС.

Отбор оптимального объема обучающей выборки входных параметров и отбор ГА значимых для прогнозирования расходов воды р. Белой параметров позволили уменьшить относительную ошибку прогноза по сравнению с результатами прогноза ИНС:

1) без учета значимых параметров на 30 %;
2) без учета объема обучающей выборки входных данных на 32 %.

Рис. 4. Фактические и прогнозируемые расход воды реки Белая в створе г. Уфа на 2008 г.

Следует отметить, что ошибка прогноза расходов воды для осенне-летней межени наибольшая. По-видимому, это связанно с тем, что в осенне-летнюю межень р. Белая имеет слабо выраженные дождевые паводки [Гареев А.М., 2001 и др.], в то время, когда влияние нескольких значимых параметров для расходов воды зашумляется их взаимным влиянием.

Выводы

Таким образом, определение фаз водного режима, отбор оптимального объема обучающей выборки и использование ГА для выбора значимых входных астрономических, климатических и гидрологических параметров нейронной сети позволяет ускорить процесс и повысить эффективность нейросетевого моделирования, что особенно актуально в чрезвычайных ситуациях, когда необходимо принимать оперативные решения.

Литература

1. *Гареев А.М.* Реки и озера Башкортостана. – Уфа: Китап, 2001. – 260 с.
2. *Георгиевский Ю.М., Шаночкин С.В.* Гидрологические прогнозы. – СПб.: РГГМУ, 2007. – 436 с
3. *Красногорская Н.Н., Елизарьев А.Н., Фащевская Т.Б., Ферапонтов Ю.М., Якупова Л.М., Нафикова Э.В.* Интеграция генетических алгоритмов и искусственных нейронных сетей для прогнозирования качества речной воды // Безопасность жизнедеятельности. 2010, № 8, с. 24-30.
4. *Леонов Е.А.* Космос и сверхдолгосрочный гидрологический прогноз. – СПб.: Алетейя, 2010. – 352 с.
5. *Сидоренков Н.С.* Атмосферные процессы и вращение Земли. – СПб.: Гидрометеоиздат. 2002. – 366 с.
6. *Хайкин С.* Нейронные сети. Полный курс. – Вильямс, 2006. – 1104 с.
7. *Maier H.R., Dandy G.C.,* 2006. The use of artificial neural networks for the prediction of water quality parameters. Water Resources Research 32 (4), 1013–1022.