

УДК 551.5→556.51/.54

ОЦЕНКА И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СТОКА МАЛЫХ РЕК В УСЛОВИЯХ АНТРОПОГЕННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ И ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА

Кузьменко Я. В.¹, Лисецкий Ф. Н.¹, Пичура В. И.²

¹Белгородский государственный национальный исследовательский университет, Белгород, Россия (308015, г. Белгород, ул. Победы, 85), e-mail: kuzmenko@bsu.edu.ru

²Херсонский государственный аграрный университет, Херсон, Украина (73006, г. Херсон, ул. Р. Люксембург, 23), e-mail: pichura@yandex.ru

Определены генетические периоды функционирования речной системы до и после антропогенного преобразования; создана кусочно-регрессионная модель формирования речного стока под влиянием климата; разработана нейросетевая модель для временного прогнозирования стока реки в зависимости от климатических факторов; получены результаты прогнозирования изменения стока малой реки до 2022 года. Установлено, что определяющим фактором формирования стока малых рек является климат, особенно погодичные комбинации условий тепло- и влагообеспеченности на территории бассейна. Антропогенная нагрузка определяет направление и силу влияния климатических факторов на динамику стока. За последние тридцать лет усилился отклик в динамике стока малой реки от климатических факторов (от 0,86 до 0,90). Преобразование русла реки коренным образом трансформирует характеристики речной системы и имеет необратимый характер. С помощью прогнозной нейросетевой модели удастся не только воссоздать общую динамику речного стока, но и учитывать вклад отдельных факторов в текущий и ожидаемый режим функционирования водных объектов.

Ключевые слова: малые реки, городские реки, климат, речной сток, моделирование, прогнозирование, нейросети.

EVALUATION AND PREDICTION OF SMALL RIVERS FLOW IN ANTHROPOGENIC IMPACTS AND CLIMATE CHANGE

Kuzmenko Y. V.¹, Lisetskii F. N.¹, Pichura V. I.²

¹Belgorod State National Research University, Belgorod, Russia (Pobeda 85, Belgorod, 308015), e-mail: lisetskii@bsu.edu.ru

²Kherson State Agrarian University, Kherson, Ukraine (st. R. Luxemburg 23, Kherson, 73006), e-mail: pichura@yandex.ru

Genetic periods functioning river system before and after the man-made changes were identified; piecewise-regression model of river flow under the influence of climate has been created; model of neural networks to predict the temporal flow of the river, depending on climatic factors was developed, the prediction results of the change in runoff small river to 2022 were obtained. It is established that determines the factor of formation of small rivers is the climate, especially the combination of the years of heat and moisture conditions in the territory of the basin. These pressures determines the direction and strength of the influence of climatic factors on the dynamics of the flow. Over the last thirty years has increased the response in a small river flow dynamics on climatic factors (0.86 to 0.90). Converting river radically transforming characteristics of the river system and is irreversible. With predictive neural network model can not only recreate the overall dynamics of river flow, but also to consider the contribution of individual factors in the current and expected mode of operation of water bodies.

Key words: small rivers, urban rivers, climate, river flow, modeling, forecasting, neural network.

Рациональное управление водными ресурсами является одной из первостепенных задач по жизнеобеспечению населения. В связи со значительным сокращением густоты речной сети за последние 200 лет [1, 7 и др.] безотлагательно необходимы научно обоснованные оценки происходящих и будущих изменений водного режима рек и водных ресурсов, а также выявление закономерностей этих изменений в современных социально-экономических и климатических условиях.

Малые реки особенно чутко реагируют на антропогенные воздействия и служат интегральным индикатором сложных природно-антропогенных процессов, происходящих на их водосборах. В современных исследованиях [3, 4, 6 и др.] бассейновые территориальные структуры рассматриваются как иерархические общности пространственных отношений, определяемых стоком воды, наносов и растворенных веществ. Интегратором эколого-хозяйственных условий на территории речных бассейнов служит величина и характеристики стока. Однако длинные ряды наблюдений на малых реках крайне редки.

На берегах малых рек проживает значительная часть населения России. Городские малые реки часто становятся объектом хищнического потребления ресурсов речной системы городскими структурами, зачастую не сильно заботящихся о сохранении и восстановлении водной экосистемы. Поэтому актуальным вопросом при ведении хозяйственной деятельности является анализ и прогноз водного режима городских малых рек.

Цель работы – используя результаты моделирования, получить прогноз изменения стока малой реки в условиях антропогенной трансформации и изменяющегося климата.

Материалы и методы

Объектом исследований выбран правый приток Северского Донца – Болховец (Везёлка). Это типичная малая река V-го порядка длиной 27 км, которая является основной рекой города Белгорода: 55 % площади городских земель приходится на ее бассейн (394 км²).

Наиболее интегральное представление о миграции и аккумуляции потоков вещества в пределах бассейна позволяет получить организованный в замыкающем створе водотоков гидроэкологический мониторинг [2, 3]. Исходными данными для анализа речного стока за 1947–2010 гг. послужили наблюдения по гидропосту на р. Везелка в черте Белгорода. Для определения влияния климатических факторов на динамику расходов воды использованы данные многолетних наблюдений метеорологических станций Харькова и Белгорода.

Учитывая высокую динамичность и сложность многих процессов гидрологического цикла, адекватность их моделирования могут обеспечить не менее сложные методы [8]. В работе применяли методы статистики (анализ временных рядов, нейронные сети), картографии и ГИС-технологии. Пространственное моделирование проводили в ArcGIS 9.3; анализ временных рядов – в STATISTICA 6.0, модуль Neural Network. Решая проблему выбора метода для создания универсальной нелинейной модели в целях прогнозирования динамики водного режима малых рек в зависимости от климатических факторов, мы использовали возможности искусственных нейронных сетей. Принцип работы нейромодели основан на том, что нейроны первого слоя получают входные сигналы, преобразуют их и через точки ветвления передают нейронам второго слоя. Далее срабатывает второй слой и т.д. до j-го, который выдает выходные сигналы аппроксимации.

Результаты

Известно, что там, где в реки поступают наносы с урбанизированных частей водосборов, донные отложения загрязнены тяжелыми металлами и другими поллютантами. Но ближе к устью содержание загрязнителей в донных отложениях снижается. Однако в случае с Везелкой, у которой нижняя треть речной долины приходится на территорию Белгорода, эта закономерность не наблюдается.

Расход речного стока 50 %-ной обеспеченности оценивается для этой реки в $1,25 \text{ м}^3/\text{с}$, для среднего маловодного года он составляет $0,91$, а для маловодного года – $0,48 \text{ м}^3/\text{с}$ [5]. Анализ формирования водного режима можно разделить на два этапа (рис. 1): природное колебание стока реки (1947–1980 гг.) и стабильное снижение расхода воды (1981–2010 гг.). Максимальный расход воды в реке Везелка за весь период составил $2,18 \text{ м}^3/\text{с}$ (1981 г.).

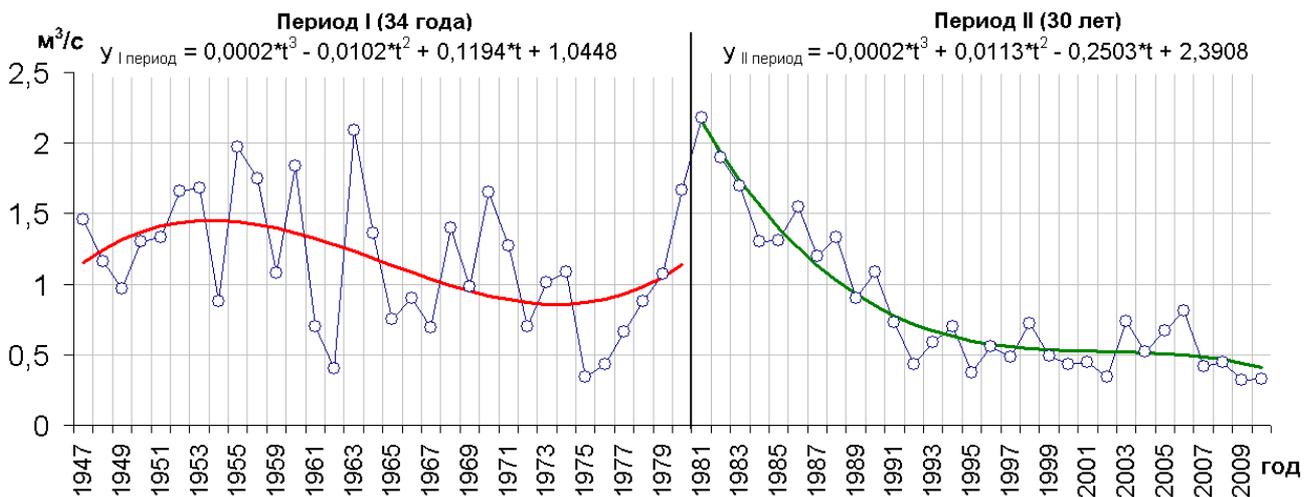


Рис. 1. Изменение расхода воды в реке Везелка за период 1947–2010 гг.

Резкое снижение расходов во втором периоде объясняется сильным антропогенным преобразованием русла Везелки. В 1980–1982 гг. и 1999–2005 гг. проводили углубление и расширение русла (с 3–5 до 37–45 м) на протяжении 2,5 км, используя земснаряд на локальных участках. По сравнению с периодом 1947–1980 гг., когда в среднем расход воды составлял $1,19 \text{ м}^3/\text{с}$, он уменьшился на $0,40 \text{ м}^3/\text{с}$ (т.е. на 34 %).

Климат является одним из основных факторов, определяющих общую величину и внутригодовое распределение стока. Для определения степени влияния климатических факторов на динамику стока, а также для обеспечения ввода климатических данных в разрабатываемую нейромодель, проведены статистические преобразования временных рядов. Вначале с помощью одномерного спектрального анализа Фурье были определены сезонные составляющие. Для динамики температуры воздуха цикл составил – 10 лет, а для динамики суммы годовых осадков и речного стока – 11 лет. Далее методом Censusu I (сезонная декомпозиция) проведена корректировка ряда (удаление сезонной составляющей) и пятиточечное центрирование

для получения сглаженных тренд-циклических рядов. Это позволяет определить закономерности развития временных рядов в «чистом» виде (рис. 2).

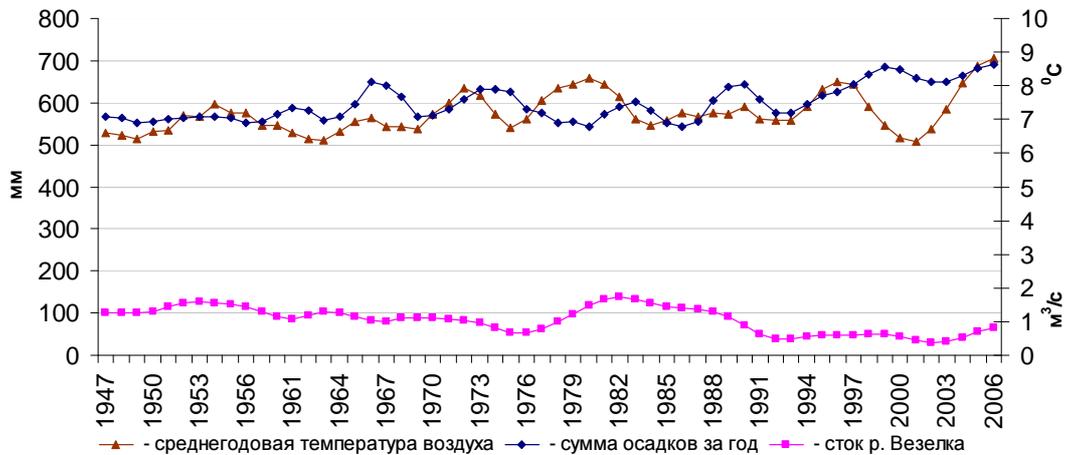


Рис. 2. Статистически преобразованные среднегодовые значения изучаемых показателей

При комплексном анализе влияния климатических факторов на динамику среднегодового стока реки (рис. 3) наблюдаются следующие сценарии формирования стока:

- при уменьшении среднегодовой температуры воздуха и минимальных, но стабильных осадках сток реки возрастает;
- при увеличении среднегодовой температуры воздуха и увеличение суммы годовых осадков сток реки стремительно уменьшается;
- при увеличении суммы осадков и уменьшения температуры сток реки увеличивается.

Для оценки влияния климата на динамику речного стока была использована кусочно-регрессионная модель. Увеличение уровня аппроксимации такой модели и определения условий формирования стока реки Везелка в зависимости от климатических факторов было достигнуто путем разделения временного ряда на два явно выраженных периода (до и после 1981 г.). Комплексная уточненная кусочно-регрессионная модель имеет вид:

$$Y = \begin{cases} I \text{ период} & \begin{cases} 0,00046 \times X_1 - 0,0133 \times X_2 + 0,655, & \text{if } 0 < Y \leq 1,234 \\ 0,00062 \times X_1 - 0,0630 \times X_2 + 1,690, & \text{if } Y > 1,234 \end{cases} \\ II \text{ период} & \begin{cases} -0,0004 \times X_1 - 0,0149 \times X_2 + 0,941, & \text{if } 0 < Y \leq 0,903 \\ -0,0003 \times X_1 + 0,1344 \times X_2 + 0,695, & \text{if } Y > 0,903 \end{cases} \end{cases}$$

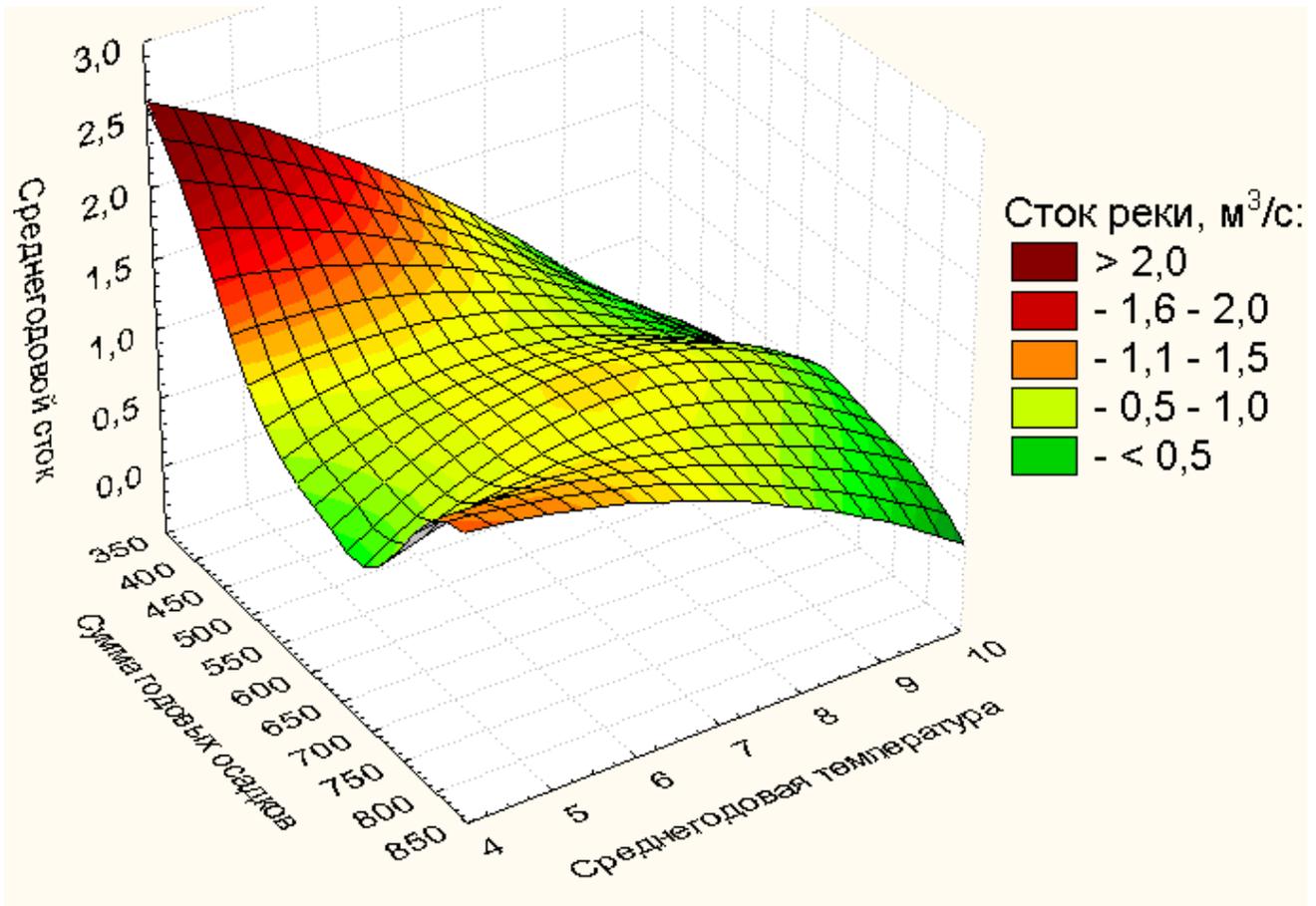


Рис. 3. Зависимость стока реки Везелка от климатических факторов

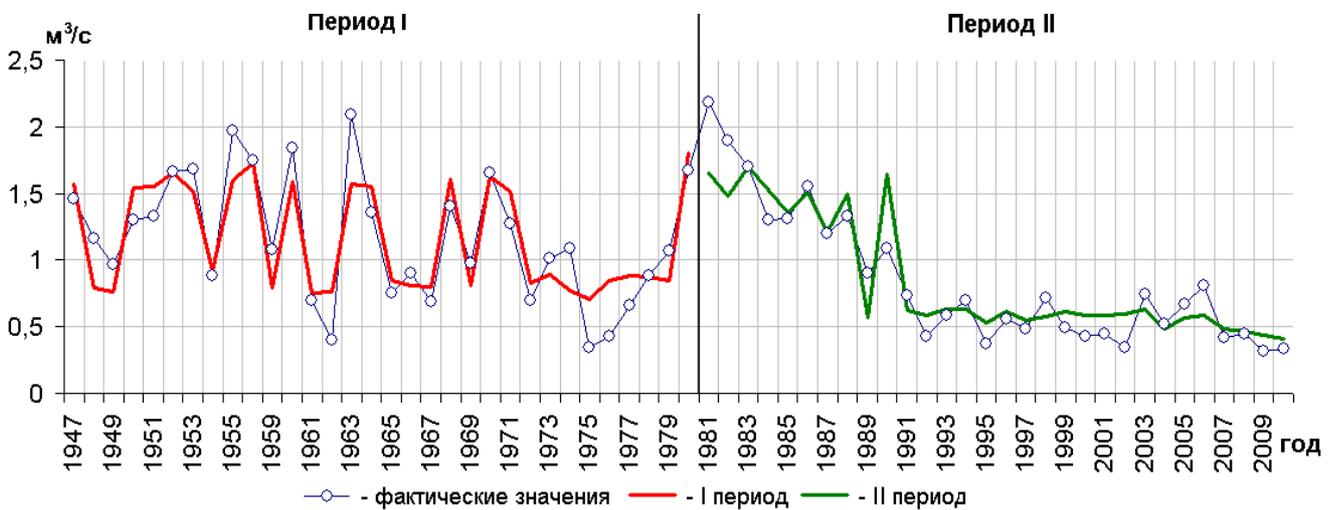


Рис. 4. Моделирование влияния климатических факторов на расходы воды реки Везелка по периодам их формирования

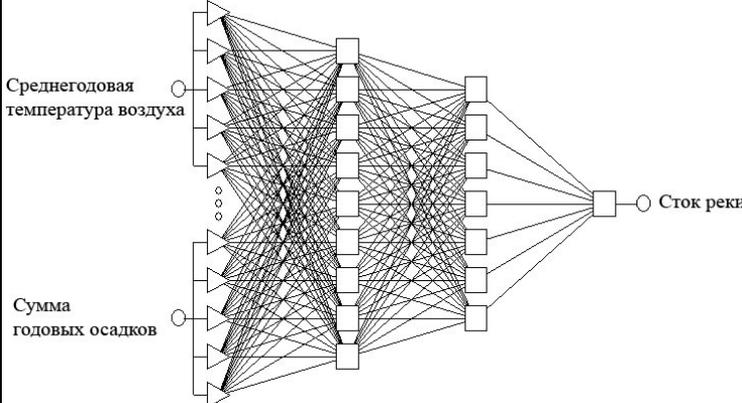
На первом этапе коэффициент корреляции влияния факторов на динамику стока реки составил – 0,86. Объясненная доля дисперсии влияния факторов равна 0,74. Коэффициент корреляции влияния факторов на динамику стока реки составил – 0,90.

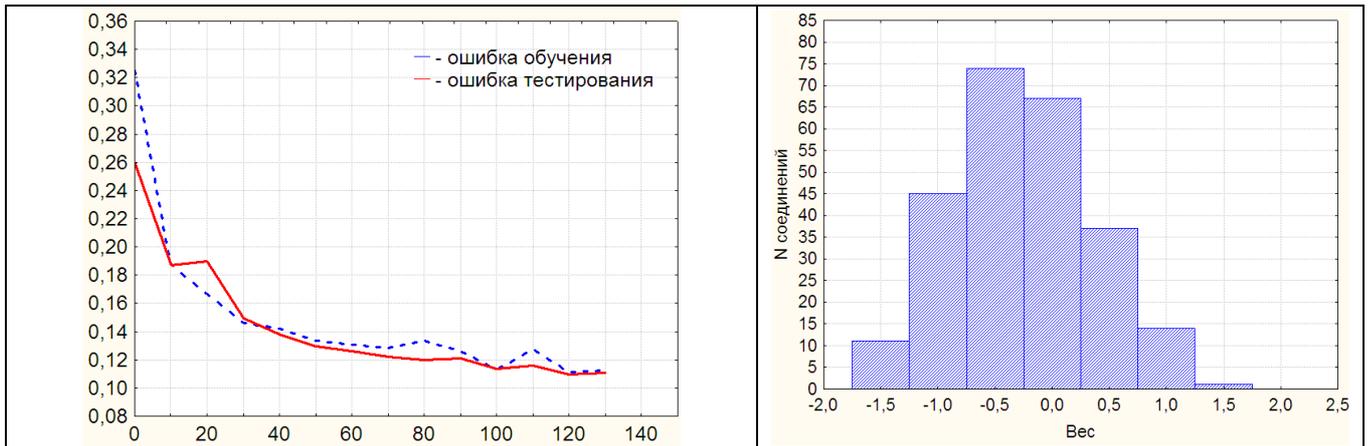
Для прогнозирования динамики стока реки в зависимости от климатических факторов создана искусственная многослойная нейромодель вида (табл. 1):

$$y_{t+1} = NN\left(\sum_{i=1}^9 x_i; \sum_{j=1}^9 z_j\right)$$

где, y – сток реки, м³/с; x – сумма годовых осадков; z – среднегодовая температура воздуха.

Таблица 1. Характеристика нейронной модели для прогнозирования динамики стока малой реки в зависимости от климатических факторов

Архитектура	Производительность			Ошибка			Обучение/эпохи	Количество нейронов в скрытом слое	
	обучения	контрольная	тестовая	обучения	контрольная	тестовая		1 слой	2 слой
МП s9 2:18-9-7- 1:1	0,223	0,450	0,561	0,051	0,102	0,129	ОР100, СГ25	9	7
Функция коррекции весовых коэффициентов	$E(w(t)) = \frac{1}{2} \left(\sum_{i=1}^2 \left(f \left(\sum_{m=1}^7 w_m^{(3)}(t) f \left(\sum_{j=1}^9 w_j^{(2)}(t) f \left(\sum_{n=1}^{18} w_n^{(1)}(t) x_n^{(t)} z_n^{(t)} \right) \right) \right) - d_i^{(t)} \right)^2 \right)$								
Функция отклика сети	$y_i(t) = f \left(\sum_{m=1}^7 w_m^{(3)}(t) f \left(\sum_{j=1}^9 w_j^{(2)}(t) f \left(\sum_{n=1}^{18} w_n^{(1)}(t) x_n^{(t)} z_n^{(t)} \right) \right) \right)$, где $i = \overline{1, 2}$								
Алгоритм обучения сети	$w_{ni}(t+1) = 0,02 \delta_i x_n(t) + 0,6(w_{ni}(t) - w_{ni}(t-1))$								
Архитектура нейросети					Свойства нейромодели				
					<p>Четырехслойный перцептрон с девятью нейронами в первом скрытом слое и семью нейронами во втором скрытом слое. Метод обучения: обратное распределение (100 эпох) и связанных градиентов (25 эпох). Матрица искусственной нейронной сети состоит из 232 весовых коэффициентов. Функция активации нейронов – синусоид-гиперболического тангенса $f(s) = \frac{e^s - e^{-s}}{e^s + e^{-s}}$</p>				
Ошибка обучения и тестирование сети					Весовая гистограмма				



Коэффициенты масштабирования входных сигналов

<i>Показатель</i>	<i>Сдвиг</i>	<i>Масштаб</i>
Среднегодовая температура воздуха	-1,350	0,247
Годовая сумма осадков	-0,875	0,002
Расход воды в год	-0,055	0,457

Смоделированная нейронная сеть обладает достаточно высокими обобщающими способностями, на что указывает хорошее совпадение исходных и предсказанных значений (верно выделенных закономерностей из входных данных) на рабочих (контрольном и тестируемом) участках. Такое качество многослойной нейронной сети обеспечило возможность корректно отображать данные, которые не использовались в обучении, и достаточно достоверно прогнозировать изменение речного стока от климатических факторов. Подтверждением результатов эффективного моделирования нейросетей для прогнозирования является анализ итоговой статистики реализации нейронных сетей на обучающей, контрольной и тестовой выборках (табл. 2). Достоверность ИНС составила – 84 %.

Таблица 2. Итоговая статистика обучения нейронной сети для прогнозирования динамики стока малой реки Везелка в зависимости от климатических факторов

Описательные статистики	Обучающая выборка	Контрольная выборка	Тестовая выборка
Математическое ожидание ошибки	0,0259	-0,0305	0,0122
Стандартное отклонение ошибки	0,1076	0,2214	0,2811
Математическое ожидание абсолютной ошибки	0,0797	0,1535	0,2121
Корреляция	0,976	0,893	0,828



Рис. 5. Динамика и прогноз стока реки Везелка

По прогнозу (рис. 5) к 2022 г. ожидаются стабильно минимальные значения стока Везелки в пределах до $0,44 \text{ м}^3/\text{с}$. Среднее значение прогнозируемого речного стока гораздо меньше его средних значений за рассматриваемые периоды, что обусловлено снижением вклада климатических факторов при коренном антропогенном изменении параметров русла.

Заключение

Анализ влияния климатических факторов на водность малой реки показал высокую зависимость погодичных величин расхода воды от совокупного влияния температуры воздуха и атмосферных осадков, т.е. главенствующим фактором при формировании речного стока малых рек являются климатические условия. За последние тридцать лет несколько усилился отклик динамики стока малой реки от климатических факторов (с $0,86$ до $0,90$). Выявлены два хорошо выраженных периода динамики стока исследуемой реки: до и после преобразования русла. Во втором периоде устойчивость водной системы была разрушена, т.е. река в городских условиях при изменении параметров русла уже не в состоянии самостоятельно противостоять антропогенному давлению и требует постоянного контроля и охраны.

Прогнозная нейросетевая модель способна не только моделировать динамику водности рек, но и учитывать разнородную информацию о текущих и ожидаемых режимах функционирования водной системы. В отличие от «традиционных» методов статистики нейронные сети находят не статистически достоверное, а правдоподобное решение задачи и могут работать при определенном дефиците эмпирических данных. Эти преимущества делают нейронные сети все более и более перспективным направлением в анализе и прогнозировании динамики стока малых рек в зависимости от факторов его формирования.

Исследование выполнено при финансовой поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» в рамках научного проекта № 14.132.21.1387.

Список литературы

1. Дегтярь А. В. Гидролого-экологический анализ деградационных процессов в речных бассейнах малых рек юго-запада Центрально-Черноземного региона: Автореф дис. ... канд. геогр. Наук. – Белгород: Изд-во БелГУ, 2005. – 22 с.
2. Дегтярь А. В., Лисецкий Ф. Н. Речной бассейн в системе геоэкологического мониторинга // Проблемы геологии, полезных ископаемых и экологии Юга России и Кавказа. – Новочеркасск, 1999. – Т. 2. – С. 125-128.
3. Концепция и программа комплексного использования природных ресурсов "ЭКО ВОРСКЛА-2005" / Забара В. И., Моргун Ф. Т., Лисецкий Ф. Н. и др. – Белгород-Борисовка: Крестьянское дело, 1997. – 74 с.
4. Кузьменко Я. В., Лисецкий Ф. Н., Нарожняя А. Г. Применение бассейновой концепции природопользования для почвоводоохранного обустройства агроландшафтов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2012. – Т. 14. – №1(9). – С. 2432-2435.
5. Лисецкий Ф. Н. Экологические исследования бассейнов малых рек Белгородской области (на примере р. Болховец) // Эколого-географические исследования в речных бассейнах: Материалы международной научно-практической конференции. – Воронеж: ВГПУ, 2001. – С. 171-173.
6. Нарожняя А. Г., Кузьменко Я. В. Бассейновое природопользование при охране окружающей среды // Проблемы региональной экологии. – 2012. – № 2. – С. 109-112.
7. Панин А. В., Иванова Н. И., Голосов В. Н. Речная сеть и эрозионно-аккумулятивные процессы в бассейне верхнего Дона // Водные ресурсы. – 1997. – Т. 24. – № 6. – С. 663-671.
8. Svetlichny A., Yergorkin I., Shvebs H., Lisetskiy F. Object-oriented approach in designing optimal agrolandscape based upon GIS // Conference Proceedings: Third European conference on GIS. Munich – Germany, March 23-26, 1992. EGIS foundation. Utrecht / Amsterdam, The Netherlands, 1992. – Vol. 1. – P. 423-430.

Рецензенты:

Корнилов А. Г., д.г.н., профессор, заведующий кафедрой географии и геоэкологии ФГАУ ВПО Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород.

Кумани М. В., д.г.н., профессор, заведующий кафедрой географии и геоэкологии ФГБОУ ВПО Курский государственный университет, г. Курск.